

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

### **Návrh technologie svařování oběžného kola**

Technology Proposal of the Impeller

Student:

Bc. Nela Dobrovodská

Vedoucí diplomové práce:

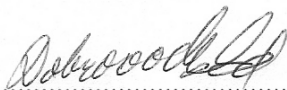
Ing. Martin Sondel, Ph.D.

Ostrava 2010

## Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

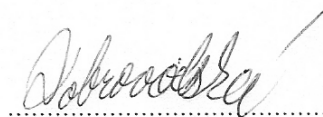
V Ostravě. 21. 5. 2010 .....

 .....

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická universita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Ostravě : 21.5. 2010 .....



podpis

éno a příjmení autora práce: Nela Dobrovodská

lresa trvalého pobytu autora práce: Goročovova 4, 700 30 Ostrava – Zábřeh

**ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

DOBROVODSKÁ, N. *Návrh technologie svařování oběžného kola : diplomová práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2010, 63 s. Vedoucí práce: Sondel, M.

Diplomová práce se zabývá metodikou svařování oběžného kola čerpadla. Teoretická část práce je zaměřena na studium svařitelnosti martenzitických chromových ocelí, včetně návrhu vhodných metod pro svařování oběžného kola čerpadla. Na základě zvolených metod svařování a základního materiálu byly navrženy vhodné přídavné materiály. V experimentální části bylo provedeno ověření svařitelnosti martenzitické chromové oceli na několika vzorcích prostřednictvím zkoušek tvrdosti, mikrotvrdosti a metalografického rozboru. Naměřené údaje byly zpracovány do tabulek, grafů a obrázků. Na základě dosažených výsledků byla optimalizována technologie svařování.

**ANNOTATION OF MASTER THESIS**

DOBROVODSKÁ, N. *Technology Proposal of the Impeller : Master Thesis.* Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava. Faculty of Mechanical Engineering. Department of Mechanical Technology, 2010, 63 p. Thesis head: Sondel, M.

Master thesis is dealing with welding method of the Impeller. The theoretical part is based on study of weldability of martensitic chromium steels, including design of appropriate methods for welding Impeller. Suitable filler materials have been designed on the basis of chosen welding methods and base materials. In the experimental part was carried out weldability verification of martensitic chromium steel for several samples by testing the hardness, microhardness and metallographic analysis. The measured data were processed into tables, graphs and pictures. Based on the results the welding technology has been optimized.

**Obsah**

<b>Seznam použitých zkratk a značení.....</b>	<b>2</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>4</b>
<b>2 Vysokolegované oceli.....</b>	<b>5</b>
<b>3 Svařitelnost martenzitických chromových ocelí.....</b>	<b>8</b>
3.1 Vlivy jednotlivých prvků na svařitelnost martenzitických chromových ocelí .....	9
3.2 Vliv teploty předehřevu na svařitelnost martenzitických chromových ocelí.....	11
3.3 Tepelné zpracování po svařování.....	12
3.4 Nepříznivé důsledky svařování martenzitických chromových ocelí .....	13
3.4.1 Pokles vrubové houževnatosti.....	13
3.4.2 Zkřehnutí 475.....	15
3.4.3 Fáze $\sigma$ .....	15
3.4.4 Korozní odolnost.....	15
3.4.5 Trhliny.....	16
3.5 Základní materiál martenzitická chromová ocel 1.4008 (GX7CrNiMo12-1).....	17
<b>4 Metody svařování martenzitických chromových ocelí .....</b>	<b>18</b>
4.1 Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (141) .....	18
4.1.1 Zásady pro svařování martenzitických chromových ocelí metodou 141 ....	20
4.2 Svařování laserem (52) .....	20
<b>5 Volba přídatných materiálů .....</b>	<b>22</b>
<b>6 Návrh experimentálních prací .....</b>	<b>24</b>
<b>7 Popis a vyhodnocení experimentálních prací.....</b>	<b>24</b>
7.1 Příprava a označení zkušebních vzorků .....	25
7.2 Chemická analýza svarového kovu a její vyhodnocení .....	26
7.3 Zkouška tvrdosti a její vyhodnocení .....	30
7.4 Zkouška mikrotvrdosti a její vyhodnocení.....	32
7.5 Zkouška rázem v ohybu a její vyhodnocení.....	36
7.6 Makrostruktura svarového spoje a její vyhodnocení .....	37
7.7 Mikrostruktura svarového spoje a její vyhodnocení.....	39
<b>8 Návrh optimalizace technologie svařování oběžného kola.....</b>	<b>43</b>
8.1 Návrh experimentálních prací.....	43
8.2 Návrh technologie svařování a realizace svařování oběžného kola.....	44
8.3 Penetrační zkouška a její vyhodnocení .....	47
8.4 Příprava a označení zkušebních vzorků .....	47
8.5 Zkouška tvrdosti a její vyhodnocení .....	48
8.6 Zkouška rázem v ohybu a její vyhodnocení.....	51
8.7 Makrostruktura svarového spoje a její vyhodnocení .....	51
8.8 Mikrostruktura svarového spoje a její vyhodnocení.....	53
<b>9 Celkové zhodnocení výsledků.....</b>	<b>57</b>
<b>10 Závěr .....</b>	<b>58</b>
<b>Použitá literatura .....</b>	<b>60</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>63</b>

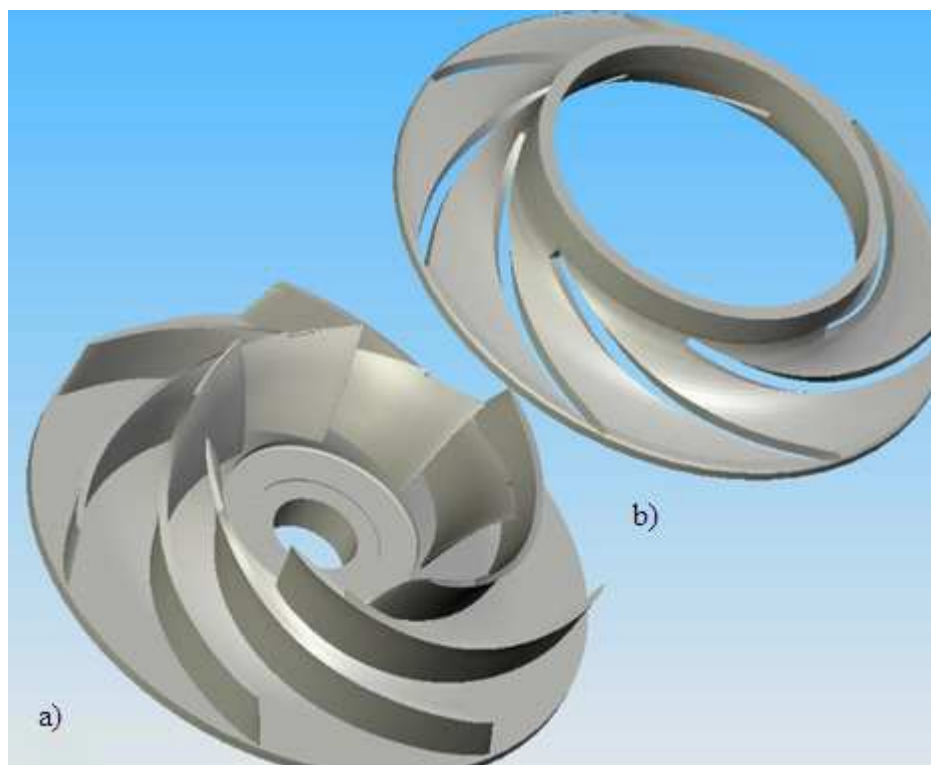
**Seznam použitých zkratk a značení**

A	Austenit	
A <sub>5</sub>	Tažnost	[%]
Ac <sub>1</sub>	Dolní kritická teplota překrystalizace	[°C]
Ac <sub>3</sub>	Horní kritická teplota překrystalizace	[°C]
Cr <sub>E</sub>	Ekvivalent chromu	[%]
F	Ferit	
F(%)	Obsah feritu	[%]
FN	Feritové číslo	
h	Hloubka neprůvaru	[mm]
HB	Tvrdost dle Brinella	
HV	Tvrdost dle Vickerse	
I	Intenzita svařovacího proudu	[A]
k	Koeficient tepelné účinnosti	
KCV	Vrubová houževnatost	[J·cm <sup>-2</sup> ]
KV	Nárazová práce	[J]
M	Martenzit	
M <sub>f</sub>	Teplota konce martenzitické přeměny	[°C]
MKK	Mezikrystalová koroze	
M <sub>s</sub>	Teplota začátku martenzitické přeměny	[°C]
Ni <sub>E</sub>	Ekvivalent niklu	[%]
PA	Poloha svařování vodorovná shora	
PB	Poloha svařování vodorovná šikmo shora	
Q	Tepelný příkon	[kJ·mm <sup>-1</sup> ]
R <sub>e</sub>	Mez kluzu	[MPa]
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R <sub>p0,2</sub>	Mez kluzu při 0,2 % prodloužení	[MPa]
SK	Svarový kov	
T <sub>i</sub>	Teplota interpass	[°C]
T <sub>m</sub>	Teplota ohřevu	[°C]
T <sub>p</sub>	Teplota předehřevu	[°C]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
U	Napětí při svařování	[V]

v	Rychlost svařování	[mm·s <sup>-1</sup> ]
VWT	Charpy V vrub ve svarovém kovu, kolmý k povrchu svarového spoje	
WPQR	Welding procedure qualification record	
ZM	Základní materiál	
$\alpha$	Ferit – železo $\alpha$	
$\gamma$	Austenit – železo $\gamma$	
$\delta$	Delta ferit – železo $\delta$	
52	Svařování laserem	
141	Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu	

## 1 Úvod

Oběžné kolo je částí rotoru některých strojů, zejména pak čerpadel a turbín. Oběžná kola se vyrábí odléváním. V případě požadavku na menší průměr a tloušťku je nelze v požadované kvalitě a čistotě vyrobít licím procesem, proto je nutné použít jinou technologii výroby např. svařování. Oběžné kolo se obvykle skládá z nosného kotouče s odlitými a zabroušenými lopatkami a z kotouče krycího, který je na nosný kotouč navařen (viz obr. 1.1). Za provozu jsou velmi namáhána a to především odstředivými silami. Volba základního materiálu oběžného kola závisí na tom, v jakém prostředí bude pracovat. Při práci v kapalinách se jako základní materiál obvykle volí vhodná korozivzdorná ocel, zpravidla martenzitická chromová. Obzvlášť se klade důraz na to, aby byla ocel odolná proti mezikrystalové korozi.[24, 30]



Obr. 1.1 Části oběžného kola (a) nosný kotouč, b) krycí kotouč)

Svařitelnost martenzitických chromových ocelí a slitin však sebou nese řadu problémů. Neustálým vývojem technologií navařování, přídavných materiálů a technologických postupů by se mělo docílit lepší jakosti a životnosti svarových spojů. Proto se věnuje martenzitickým ocelím nemalá pozornost.



Diplomová práce se zabývá problematikou svařitelnosti martenzitických ocelí používaných pro výrobu oběžných kol. Cílem je stanovit vhodné metody svařování, svařovací parametry a podmínky tak, aby se zajistila vyhovující jakost svarových spojů oběžného kola a zároveň se zachovaly korozivzdorné vlastnosti použitého základního materiálu.

## 2 Vysokolegované oceli

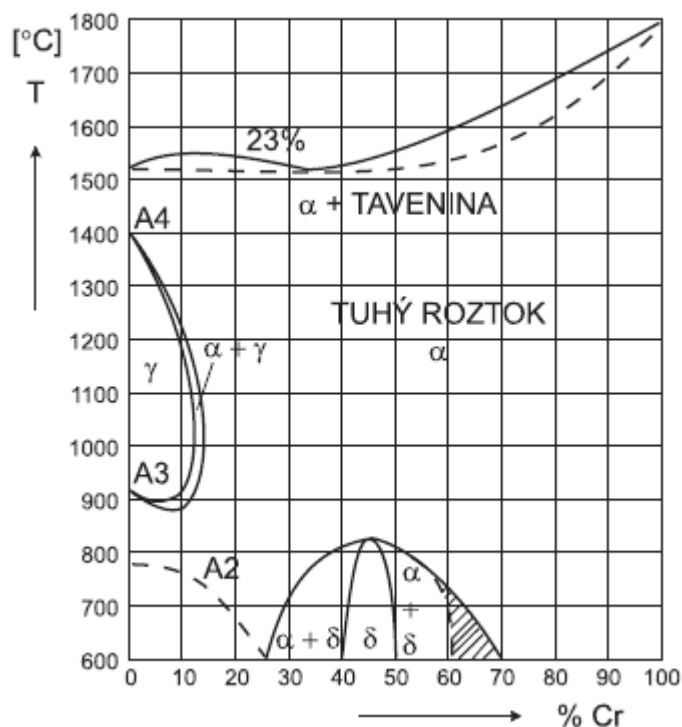
Vysokolegované oceli obsahují více než 10 hm.% celkového obsahu legur. Vyrábí se pro např. zlepšení korozních, žáruvzdorných, žárovevých vlastností, zvýšení odolnosti proti opotřebení atd. Korozivzdorné oceli mají zvýšenou odolnost proti korozi za normální i zvýšené teploty. Odolávají různým roztokům solí, kyselinám, parám a plynům. Za určitých podmínek se kovy a slitiny pokryjí ochrannou vrstvou, která velmi zpomalí průběh koroze, stávají se vůči korozi pasivními. Tuto schopnost má chrom, který si ji uchovává i ve slitinách s železem.[3, 4, 5]

Pasivační vrstva je velmi tenká, souvislá, nepropustná a tvoří se jen tehdy, pokud je v matici rozpuštěno minimálně 11,7 hm.% Cr. Protože část chromu se váže na uhlík jako karbid  $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ , musí být obsah chromu v oceli 12 hm.% až 14 hm.%. Se stoupajícím obsahem chromu se zvyšuje stálost ocelí. Tvorbu pasivační vrstvy také podporuje nikl, který zároveň zvyšuje odolnost proti redukčním kyselinám (kyselina solná a sírová). Dalšího zlepšení můžeme dosáhnout přidáním molybdenu, který zvyšuje odolnost proti bodové korozi a proti působení chloridů.[4]

Dle obsahu hlavních legur a dosažené mikrostruktury můžeme vysokolegované oceli rozdělit na tyto hlavní skupiny:[3]

- Feritické chromové oceli
- Martenzitické chromové oceli
- Austenitické Cr-Ni, nebo Cr-Ni-Mo oceli
- Duplexní Cr-Ni, nebo Cr-Ni-Mo oceli

Struktura vysokolegovaných ocelí závisí na jejich chemickém složení. Rovnovážný diagram železo – chrom (viz obr. 2.1) poskytuje základní informace o možných strukturách.[3]

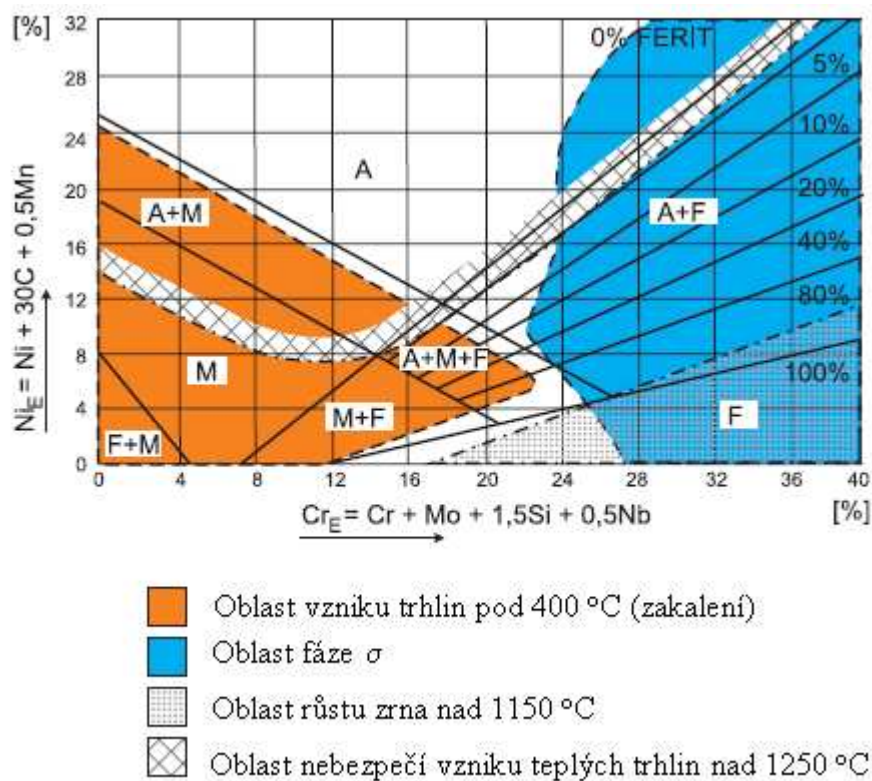


Obr. 2.1 Rovnovážný diagram železo – chrom[27]

Legující prvky, které nám ovlivňují strukturu vysokolegovaných ocelí lze rozdělit do dvou skupin:[3]

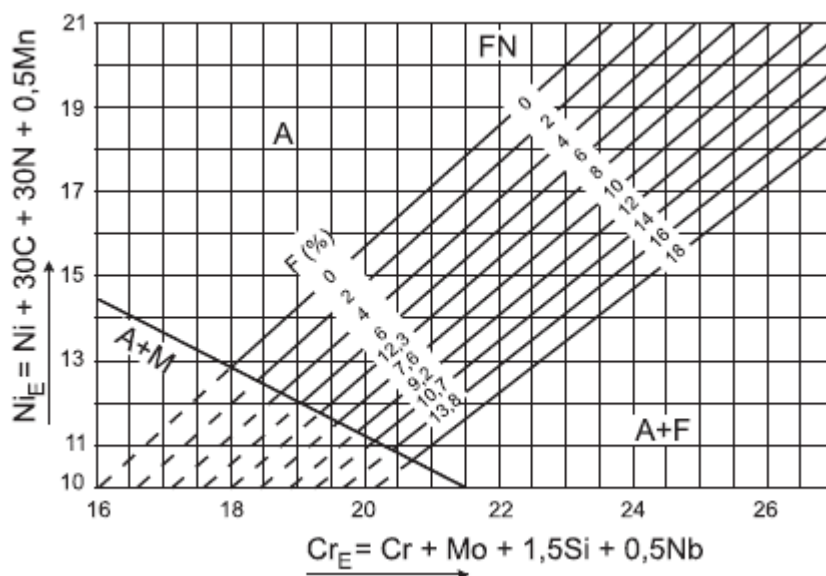
- Austenitotvorné, které rozšiřují v rovnovážném diagramu železo – chrom oblast  $\gamma$ : C, Ni, Cu, Mn, N
- Feritotvorné, které zužují v rovnovážném diagramu železo – chrom oblast  $\gamma$ : Cr, Mo, Si, Al, W, Ti, Nb, V

Pro odhadnutí výsledné struktury těchto ocelí se používá Schaefflerův diagram (viz obr. 2.2) a De Longův diagram (viz obr. 2.3). Vliv všech feritotvorných prvků vyjadřuje ekvivalent chromu  $\text{Cr}_E$  a vliv všech astenitotvorných prvků ekvivalent niklu  $\text{Ni}_E$ . [3]



Obr. 2.2 Schaefflerův diagram[27]

De Longův diagram upřesňuje Schaefflerův diagram tak, že do  $Ni_E$  zařadil De Long jako významný austenitotvorný prvek dusík s koeficientem 30.[3]



Obr. 2.3 De Longův diagram[27]

Z obou diagramů můžeme určit také obsah  $\delta$  feritu, ale jen z De Longova diagramu je možné určit tzv. Feritové číslo FN.[1, 3]

### 3 Svařitelnost martenzitických chromových ocelí

Martenzitické chromové oceli s obsahem 13 hm.% až 17 hm.% Cr a až 4 hm.% Ni se používají jako korozivzdorné. Tyto oceli odolávají méně agresivním prostředím (vzduch, voda, pára) a mají vysokou odolnost proti kavitaci. Proto se používají na výkovky a odlitky vodních turbín, čerpadel atd.[3, 4, 5]

Dle chemického složení se dělí na:[3]

- martenzitické oceli,
- martenziticko austenitické oceli,
- precipitačně vytvrzené martenzitické oceli.

#### **Martenzitické oceli**

Martenzitické oceli jsou při pokojové teplotě plně martenzitické a proto jsou velmi křehké a tvrdé. Popuštěním se dosáhne vyšší tažnosti a houževnatosti, ale dojde ke snížení pevnosti v tahu.[13]

#### **Martenziticko austenitické oceli**

Martenziticko austenitické oceli jsou legovány 13 hm.% Cr, 4 hm.% až 6 hm.% Ni, 0,4 hm.% až 1,0 hm.% Mo a 0,06 hm.% C. Martenzitická matrice těchto ocelí může obsahovat 5 % až 25 % austenitu. Tyto materiály jsou lépe svařitelné než klasické martenzitické chromové oceli. Zároveň lépe odolávají korozi, kavitaci a dosahuje se u nich vyšších hodnot vrubové houževnatosti. Zlepšení svařitelnosti a zvýšení hodnot vrubové houževnatosti vyplývá z jejich mikrostruktury, která je martenziticko-austenitická. Austenit rozpouští vodík difundující ze svarového kovu, čímž snižuje náchylnost k tvorbě studených trhlin a zároveň zlepšuje vrubovou houževnatost. Nízkouhlíkový martenzit je méně tvrdý a křehký než martenzit vznikající při svařování klasických typů martenzitických chromových ocelí. Používají se především na výrobu vodních turbín a čerpadel.[3]

## **Precipitačně vytvrzené martenzitické oceli**

Precipitačně vytvrzené martenzitické oceli jsou dolegovány Cu, Ti, Nb, Mo, Al a obsah uhlíku je nižší než 0,1 hm.%. Svařují se v žíhaném, popuštěném, zušlechťeném nebo tvrdém stavu. Základním problémem těchto ocelí je při svařování prokalitelnost a náchylnost na tvorbu studených trhlin.[3]

### **3.1 Vlivy jednotlivých prvků na svařitelnost martenzitických chromových ocelí**

#### **Uhlík**

Uhlík je austenitotvorný prvek a je přítomen ve všech ocelích. Při vyšším obsahu uhlíku se zvyšuje mez kluzu, pevnosti a tvrdost, klesají však plastické vlastnosti a zhoršuje se svařitelnost. V ocelích se zaručenou svařitelností se snižuje obsah uhlíku pod 0,14 hm.%. S rostoucím obsahem uhlíku se zvyšují také hodnoty tvrdosti martenzitu. Uhlík rozšiřuje oblast  $\gamma$  směrem k vyšším obsahům chromu (viz obr. 2.1 Rovnovážný diagram železo – chrom). Pokud chceme zabránit vylučování  $\delta$  feritu v matrici je třeba snížit obsahu uhlíku a s ním i ekvivalent chromu.[2, 3, 4, 5]

#### **Chrom**

Chrom je feritotvorný prvek. Oceli s obsahem Cr nad 5 hm.% jsou samokalitelné. Při obsahu chromu do 13 hm.% prodělává slitina transformaci  $\alpha$ - $\gamma$ - $\alpha$ . Při obsahu chromu nad 13 hm.% je oblast feritu. Tato jednofázová slitina bude mít při ohřevu nad 900 °C hrubé zrna a bude křehká. Při obsahu chromu nad 25 hm.% vzniká fáze  $\sigma$ , která vyvolává křehnutí slitin železo – chrom. Do teploty 820 °C je fáze  $\sigma$  stabilní.[1, 3]

#### **Nikl**

Je austenitotvorný prvek. Snižuje kritickou rychlost ochlazování a tím zvyšuje prokalitelnost oceli. Zlepšuje plastické vlastnosti. Nikl potlačuje sklon ke zhrubnutí zrna při svařování. Větší korozní odolnosti chromových ocelí dosáhneme dolegováním niklu o obsahu alespoň 1 hm. %.[1, 2, 3, 4]

#### **Křemík**

Je feritotvorný prvek, který zvyšuje obsah  $\delta$  feritu. Proto se jeho horní hranice omezuje na max. 0,70 hm.%. Přebytek křemíku zvyšuje náchylnost martenzitických chromových ocelí k horkým trhlinám.[1, 4]

**Mangan**

Je austenitotvorný prvek, který zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti, aniž by byla do určitého obsahu snížena plasticita. Pomocí manganu můžeme snížit obsah síry v oceli nebo svarovém kovu.[1, 2]

**Molybden**

Je feritotvorný prvek, zvyšuje odolnost proti bodové korozi, schopnost pasivace a odolnost proti popouštění.[1, 4]

**Fosfor**

Zvyšuje mez kluzu, pevnosti a odolnost proti atmosférické korozi. Snižuje plasticitu oceli a způsobuje zkřehnutí za studena. Jeho obsah se doporučuje max. 0,025 hm.%.[2, 4]

**Síra**

Způsobuje náchylnost na vznik teplých likvačních trhlin a lamelárních trhlin. Zpomaluje tvorbu pasivační vrstvy, a proto by měl být její obsah co nejnižší.[2, 4]

**Vodík**

Vodík je ve slitinách železa nežádoucí příměsí. Největší rozpustnost vodíku je v železe  $\gamma$ . Je příčinou řady vad jako je pórovitost, oduhličení svarového kovu, vznik tzv. rybích ok a trhlin ve svarovém kovu a TOO.[2]

**Dusík**

Je silně austenitotvorný prvek, který zvyšuje mez kluzu, pevnosti a tvrdost. Současně snižuje plastické vlastnosti. Částečně nebo i úplně může nahradit nikl v korozivzdorných ocelích. Má příznivé účinky na zjemnění zrna.[2]

**Hliník**

Je feritotvorný prvek. Chrání kov před oxidací za vysokých teplot, ale zvyšuje citlivost na vznik trhlin. Obsah hliníku se doporučuje co nejnižší, protože při obsahu nad 0,020 hm.% klesá vrubová houževnatost oceli.[1, 4]

**Měď**

Je slabě austenitotvorný prvek, který prakticky neovlivňuje strukturu. Do korozivzdorných ocelí se přidává pro zlepšení chemické odolnosti proti některým kyselinám.[1]

**Titan**

Je silně feritotvorný prvek, který má vliv na zjemnění zrna feritických ocelí. Spolu s uhlíkem vytváří karbid titanu, který předchází vzniku a precipitaci karbidu chromu v oblasti teplot 700 °C.[1]

**Niob**

Je feritotvorný prvek potlačující vznik karbidu chromu.[1]

**Vanad a Wolfram**

Jsou feritotvorné prvky zlepšující některé mechanické vlastnosti za tepla.[1, 2]

### **3.2 Vliv teploty předehřevu na svařitelnost martenzitických chromových ocelí**

Sklon k zakalení TOO svarového spoje ovlivňuje náchylnost svarových spojů ke vzniku studených trhlin. Jejich vznik je kromě chemického složení materiálu ovlivňován obsahem difuzního vodíku ve svaru, tloušťkou svařovaných dílců a množstvím tepla vneseného do svarového spoje. Riziko vzniku studených trhlin ve svarových spojkách výrazně snižuje předehřev svarových spojů.[2]

#### Výhody předehřevu:[2]

- snižuje rychlost ochlazování svaru, čímž zabraňuje zakalení TOO svarového spoje a svarového kovu,
- umožňuje vznik příznivějších struktur z hlediska difuze vodíku,
- prodlužuje čas, po který může vodík difundovat ze svarového spoje,
- přispívá ke snížení zbytkových napětí vyvolaných svařováním.

Teplota předehřevu se stanovuje výpočtem dle empirických rovnic sestavených na základě statistického vyhodnocení zkoušek praskavosti, nebo dlouhodobých praktických zkušeností.[2]

U vysokolegovaných ocelí není zatím možné určit teplotu předehřevu výpočtem, neboť pro tento druh ocelí nebyly stanoveny žádné empirické rovnice. Při nižších obsazích uhlíku se obecně doporučuje teplota předehřevu přibližně 250 °C tedy mezi  $M_f$  (150 °C) a  $M_s$  nebo na teplotu ležící těsně pod tímto bodem (200 °C). Při této teplotě předehřevu zůstává v průběhu svařování ve struktuře dostatečné množství austenitu, který je plastický a ve kterém se rozpouští difuzní vodík. To umožňuje částečně snížit vnitřní napětí. Doporučené teploty předehřevu dle obsahu uhlíku jsou uvedeny v tab. 3.1. V tab. 3.2 jsou pak uvedeny doporučené teploty předehřevu dle druhu martenzitické chromové oceli.[3, 5, 7, 13]

Tab. 3.1 Doporučené teploty předehřevu dle obsahu uhlíku[7]

Obsah uhlíku [hm. %]	Teplota předehřevu $T_p$ [°C]
do 0,10	min. 50
0,10 – 0,20	200 – 250
0,20 – 0,50	250 – 320
nad 0,50	250 – 320

Tab. 3.2 Doporučené teploty předehřevu dle druhu oceli[13]

Druh oceli	Teplota předehřevu $T_p$
Martenzitické oceli	$C > 0,1$ hm.% předehřev 200 °C až 300 °C
Martenziticko austenitické oceli	tloušťka $\leq 8$ mm není předehřev požadován
	pro větší tloušťky předehřev 100 °C až 200 °C
Precipitačně vytvrzené martenzitické oceli	předehřev není požadován

Předehřev svarových spojů se provádí dle normy ČSN EN ISO 13916. Tato norma mimo jiné stanovuje další důležité teploty pro provedení svaru jako je teplota interpass ( $T_i$ ) a teplota ohřevu ( $T_m$ ).[2, 12]

Teplota interpass se předepisuje v rozmezích teplot  $M_s$  – teplota předehřevu a obvykle se uvádí jako maximální teplota. Po svařování se doporučuje velmi pomalé ochlazování a v případě větších tloušťek se ochlazuje na mezioperační teplotu cca 180 °C a z této teploty následuje žíhání svaru.[2, 3, 7]

### 3.3 Tepelné zpracování po svařování

Účelem tepelného zpracování martenzitických chromových ocelí je nejen snížit zbytková napětí, ale také popustit martenzit tzn. snížit jeho tvrdost, pevnost a zvýšit jeho



houževnatost a tažnost. U tupých, tlustostěnných a tvarově členitých svařenců je nutné provést tepelné zpracování ihned po svaření bez meziochlazení na teplotu okolí. Pokud to není možné, musíme svařenec držet až do doby tepelného zpracování na mezioperační teplotě min. 100 °C. Je však nezbytné ochladit svařenec pod teplotu  $M_f$  (cca 150 °C), aby beze zbytku proběhla martenzitická transformace. Před tepelným zpracováním musíme mít jistotu, že proběhla přeměna austenitu na martenzit. Svar se proto zkouší magnetem.[3, 5, 7]

Martenzitické chromové oceli se obvykle tepelně zpracovávají popouštěním při teplotách pod  $Ac_1$ . Popouštěcí teplota se volí dle požadované vrubové houževnatosti a odolnosti proti korozi. Pokud se žádá maximální houževnatost, popouštějí se tyto oceli těsně pod teplotou začátku austenitické transformace, nejčastěji mezi teplotami 700 °C až 750 °C. Při popouštěcí teplotě 550 °C klesá odolnost proti korozi, protože se vylučují karbidy chromu. Obsah uhlíku a dalších legujících prvků ovlivňují popouštěcí teplotu (viz tab. 3.3).[3, 4]

Tab. 3.3 Vliv legujících prvků na teplotu  $Ac_1$ [4]

Prvek	Ni	Mn	Co	Si	Al	Mo	V
Změna teploty [°C]	-30	-25	-5	+25	+30	+25	+50

Při svařování martenzitických chromových ocelí nastane v tepelně ovlivněné oblasti plné zakalení blízko svaru a popouštění dále do svaru. Zakalením při svařování se zvýší tvrdost, zmenší se houževnatost a zároveň vzniknou velká vnitřní napětí. Čím je tloušťka materiálu větší a čím rychleji probíhá ochlazování, tím větší a nebezpečnější jsou tato napětí. Svařený předmět, v němž je přechodové pásmo zakalené, vyžaduje vyžihání při teplotě 750 °C až 800 °C. Doba žihání se určuje dle tloušťky, teplot a ostatních okolností na 30 min až 6 h. Při teplotách 200 °C až 300 °C mohou vznikat nízkoteplotní žhací trhliny. Proto se doporučené rychlosti ohřevu na žhací teplotu pohybují v rozmezí 30 °C/1h až 80 °C/1h dle tuhosti a tvarové členitosti konstrukce.[3, 5]

### 3.4 Nepříznivé důsledky svařování martenzitických chromových ocelí

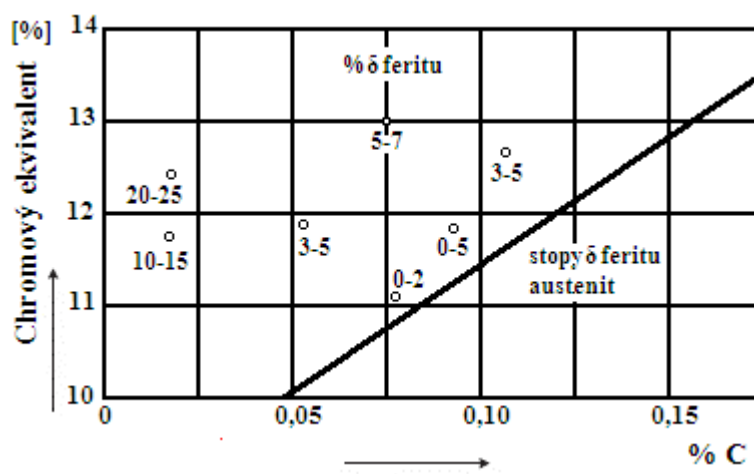
#### 3.4.1 Pokles vrubové houževnatosti

Na pokles vrubové houževnatosti má největší vliv obsah  $\delta$  feritu. Obsah uhlíku, chromu a dalších legujících prvků výrazně ovlivňuje obsah  $\delta$  feritu v matici (viz tab. 3.4). [4]

Tab. 3.4 Vliv prvků na obsah  $\delta$  feritu[7]

Prvek	N	C	Ni	Co	Cu	Mn	W	Si	Mo	Cr	V	Al
Změna obsahu $\delta$ feritu [%]	-20	-18	-10	-6	-3	-1	+8	+8	+11	+15	+19	+38

Při vyšším obsahu uhlíku se z taveniny vylučuje  $\delta$  ferit, který prodělává částečnou nebo úplnou transformaci na austenit. Při velmi pomalém ochlazení se austenit mění na  $\alpha$  ferit, při rychlém na martenzit. Rozpustnost uhlíku v  $\delta$  feritu při teplotě 850 °C je 0,05 %. V martenzitických chromových ocelích, které jsou mechanicky namáhané, se povoluje max. 20 %  $\delta$  feritu. Při větším množství klesá vrubová houževnatost. Nepříznivý vliv  $\delta$  feritu také závisí na jeho rozložení v základní matici. Pokud tvoří uzavřené ostrůvky, je pokles houževnatosti nejmenší. Množství  $\delta$  feritu lze určit z Schaefflerova diagramu (viz obr. 2.2), De Longova diagramu (viz obr. 2.3) a diagramu zobrazeného na obr. 3.4, kde na jeho výskyt má vliv ekvivalent chromu a obsah uhlíku.[4]



Obr. 3.4 Vliv uhlíku a chromového ekvivalentu na výskyt  $\delta$  feritu  
v matici martenzitické chromové oceli[4]

Chromový ekvivalent je v tomto případě vypočten ze vztahu:[4]

$$Cr_E = Cr + 2Si + 1,5Mo - 2Ni - Mn \quad (3.1)$$

Z diagramu je zřejmé, že při snižování uhlíku je nutné snížit také ekvivalent chromu, aby se v matici nevylučoval  $\delta$  ferit. Abychom však zachovali korozivzdorné vlastnosti oceli, můžeme chromový ekvivalent snížit přísadou austenitotvorného prvku.[4]

### 3.4.2 Zkřehnutí 475

U ocelí s obsahem Cr větším než 15 hm.% může při teplotách 400 °C až 450 °C nastat zkřehnutí 475, které je doprovázeno poklesem tažnosti. Tento jev lze odstranit ohřevem na teplotu 540 °C s následujícím prudkým ochlazením na teplotu okolí.[3]

### 3.4.3 Fáze $\sigma$

Jedná se o tvrdou, křehkou intermetalickou sloučeninu, která je příčinou zkřehnutí martenzitických chromových ocelí při pokojové teplotě. V určitých případech snižuje korozní odolnost. Fáze  $\sigma$  se projeví při obsahu chromu vyšším než 10 hm.%. Vzniká ve svarových spojích při teplotách 500 °C až 820 °C. Do teploty 820 °C je  $\sigma$  fáze stabilní, při teplotě 825 °C se přemění na  $\alpha$  fázi.[3]

Hlavní činitelé podporující vznik  $\sigma$  fáze:[3]

- feritotvorné prvky vyvolávají vznik chromem bohatší fáze  $\alpha$  a tím usnadní přeměnu ve fázi  $\sigma$ ,
- karbidotvorné prvky (Ti, Zr, Ta, Nb), které zabraňují vazbě na karbidy, a tak se posunuje obsah chromu k vyšším obsahům,
- heterogenita taveb,
- místní přesycení chromem při rychlém ochlazení,
- stupeň jemnosti struktury,
- intenzivní tváření za studena,
- únava za tepla, atd.

### 3.4.4 Korozní odolnost

U martenzitických chromových ocelí se vyskytuje štěrbinová, důlková a mezikrystalová koroze. Martenziticko austenitické oceli se vyznačují lepší korozní odolností než oceli martenzitické.[13]

Mezikrystalová koroze vzniká v pásmu zcitlivění při teplotách 425 °C až 815 °C a při obsahu uhlíku od 0,03 hm.%. [3]

Teorie příčin vzniku MKK:[3]

- teorie ochuzení,
- teorie pnutí,
- teorie článků.

Prostřednictvím teorie ochuzení se vysvětluje MKK snížením obsahu chromu v okolí vylučujících se karbidů a nitridů chromu. Vyloučením karbidů  $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$  a  $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$  klesne obsah chromu na hranicích zrn. Tato vrstva přestává být schopna pasivace a rychle podléhá korozi.[3]

Dle teorie pnutí vznikají velká vnitřní pnutí v místech, kde se začíná vylučovat a růst druhá fáze. Tím vzniknou ve struktuře oceli značné energetické rozdíly, které způsobují nedokonalou pasivaci hranic zrn.[3]

Teorie mikročlánků uvádí, že ušlechtilější karbid (nitrid) působí jako katoda a okolní méně ušlechtilý kov jako anoda. Na hranici karbid – základní kov se předpokládá článek, v němž okolí karbidů (nitridů) značně koroduje.[3]

Odolnost martenzitické chromové oceli proti MKK je možné zvýšit potlačením precipitace karbidů chromu.[3]

### **3.4.5 Trhliny**

Martenzitické chromové oceli jsou náchylné především na studené trhliny. Na vznik studených trhlin má vliv obsah vodíku, napětí svařované konstrukce, rychlost ochlazování, chemické složení a v případě martenziticko austenitických ocelí i procentní podíl martenzitu. S rostoucím obsahem uhlíku se zvyšuje citlivost na praskání. Nízkouhlíkové oceli jsou méně citlivé na studené trhliny a mohou být proto svařovány bez předehřevu. Vzniku studených trhlin můžeme předejít v závislosti na druhu slitiny zařazením předehřevu a žíháním po svařování.[13]

Martenzitické chromové oceli mohou být náchylné na vznik žíhacích a teplých trhlin, ale není to běžným problémem.[7, 13]

### 3.5 Základní materiál martenzitická chromová ocel 1.4008 (GX7CrNiMo12-1)

Ocel 1.4008 je martenzitická chromová ocel s přísadou niklu vhodná především na odlitky. Standardizované chemické složení oceli je uvedeno v tab. 3.5. Přidáním niklu o obsahu 1 hm.% se u těchto ocelí zamezilo vzniku  $\delta$  feritu v matrici a zároveň se zvýšila prokalitelnost a houževnatost. Odlitky svařujeme po žíhání na měkko, po homogenizačním žíhání a po šlechtění. U odlitku s větší tloušťkou stěny je nutné počítat s odmíšením prvků, což vede k vylučování  $\delta$  feritu. Jelikož klesá houževnatost, doporučuje se udržovat obsah austenitotvorných prvků na horní hranici a obsah feritotvorných prvků na spodní.[4, 6]

Tab. 3.5 Chemické složení oceli 1.4008[11]

Chemické složení [hm.%]							
C max.	Si max.	Mn max.	Cr	Mo	Ni	P max.	S max.
0,1	1,0	1,0	12,0 – 13,5	0,2 – 0,5	1,0 – 2,0	0,035	0,025

Z martenzitické chromové oceli 1.4008 se odlévají větší, náročné odlitky, které musí mít vysoké mechanické vlastnosti (mez kluzu, pevnost, vrubovou a lomovou houževnatost). Aby se získaly maximální plastické vlastnosti, doporučuje se homogenizační žíhání na teplotě 1020 °C až 1050 °C, kalení z teploty 1030 °C až 1050 °C do oleje nebo na vzduchu a popouštění těsně pod teplotou  $A_{c1}$ . Při ochlazování z popouštěcí teploty se transformuje nový austenit na martenzit, který snižuje houževnatost. Ochlazovací rychlost by měla být tak vysoká, aby se maximálně potlačila popouštěcí křehkost. Doporučené teploty pro tepelné zpracování jsou uvedeny v tab. 3.6. Žíhání ke snížení pnutí by mělo být vždy o 20 °C nižší než skutečná teplota popouštění.[4, 14]

Tab. 3.6 Doporučené teploty pro tepelné zpracování oceli 1.4008[14]

Způsob	Teplota [°C]	Postup
Žíhání na měkko	720 až 770	Pec
Homogenizační žíhání	1020 až 1050	Vzduch pod 200 °C
Normalizační žíhání	900 až 950	Vzduch pod 200 °C
Popouštění	680 až 740	Vzduch, pec
Žíhání ke snížení pnutí	660 až 720	Vzduch, pec

Pro správné určení teploty tepelného zpracování martenzitické chromové oceli se doporučuje použít rovnice dle Iwabuchiho a Suzukiho (viz 2, 3, 4).[4]

$$Ac_3 = 941,9 - 278,88 \cdot C - 14,48 \cdot Ni \quad (3.2)$$

$$Ac_1 = 757,8 - 3,19 \cdot Ni - 21,45 \cdot Ni^2 \quad (3.3)$$

$$M_s = 422,7 - 787 \cdot C - 17,38 \cdot Ni \quad (3.4)$$

Mechanické vlastnosti martenzitické chromové oceli 1.4008 jsou uvedeny v tab. 3.7.

Tab. 3.7 Mechanické vlastnosti oceli 1.4008[11]

Průměr, tloušťka do [mm]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ min. [MPa]	Pevnost $R_m$ od do [MPa]	Tažnost $A_5$ min. [%]	Tvrdost HB	Nárazová práce KV min. [J]
300	440	590 – 780	15	170 – 240	27

Martenzitická chromová ocel 1.4008 je vhodná na odlitky oběžných kol, lopatek a dalších součástí vodních turbín, na součásti vodních čerpadel, které jsou vystaveny korozi a kavitaci. Ocel se vyznačuje kovově lesklým povrchem, odolává korozi ve vodě a v pasivním stavu některým kyselinám. Je pro ni typická zvýšená odolnost proti kavitaci.[14]

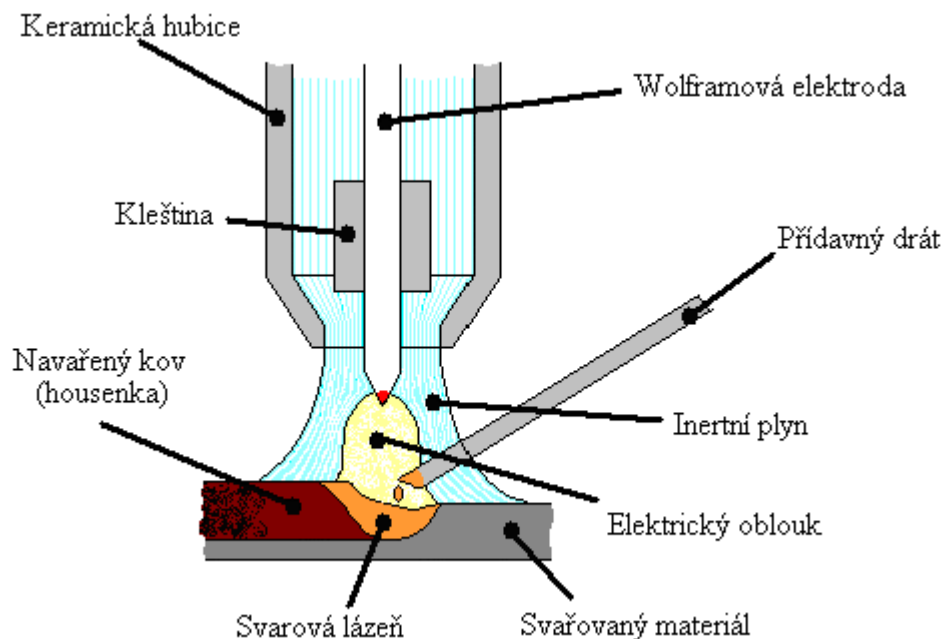
## 4 Metody svařování martenzitických chromových ocelí

Pro svařování martenzitických chromových ocelí se nejčastěji používají metody obloukového svařování. Zejména se jedná o metodu obloukového svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (dle ČSN EN ISO 4063 metoda 141). Pro svařování je však možné použít i nekonvenční technologie svařování např. svařování laserem (dle ČSN EN ISO 4063 metoda 52). Tepelný příkon se doporučuje volit v rozsahu  $0,5 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$  až  $1,5 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$  a má se zabránit použití příliš vysokého nebo nízkého tepelného příkonu.[2, 3, 13, 15]

### 4.1 Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (141)

Při svařování metodou 141 hoří oblouk mezi netavicí se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Jako ochranná atmosféra se používá inertní plyn argon, helium,

nebo směsi plynů argon-helium, argon-vodík, argon-dusík. Princip obloukového svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu je zobrazen na obr. 4.1.[9, 10]



Obr. 4.1 Princip svařování metodou 141[28]

Lze svařovat buď bez přídavného materiálu, nebo s přídavným materiálem ve formě drátu. Drát je do oblouku přiveden ručně, nebo podavačem drátu.[9]

Aby se dosáhlo úzké tepelně ovlivněné oblasti, je nutné při svařování udržovat krátký oblouk. K ochraně kořene svaru před oxidací se používá ze strany kořene tzv. formovací ochranný plyn.[9]

#### Druh proudu při svařování metodou 141:[9]

- střídavý proud – pro hliník, hořčík a jejich slitiny,
- stejnosměrný proud – pro ocel, měď, titan a jejich slitiny.

Svařovací hořáky patří mezi nejzatíženější části svařovacího zařízení. Zajišťují přívod elektrického proudu k elektrodě, fixují polohu wolframové elektrody, přívod a usměrnění ochranného plynu. Do 150 A se jedná o hořáky chlazené procházejícím plynem, od 350 A do 500 A hořáky chlazené vodou.[10]

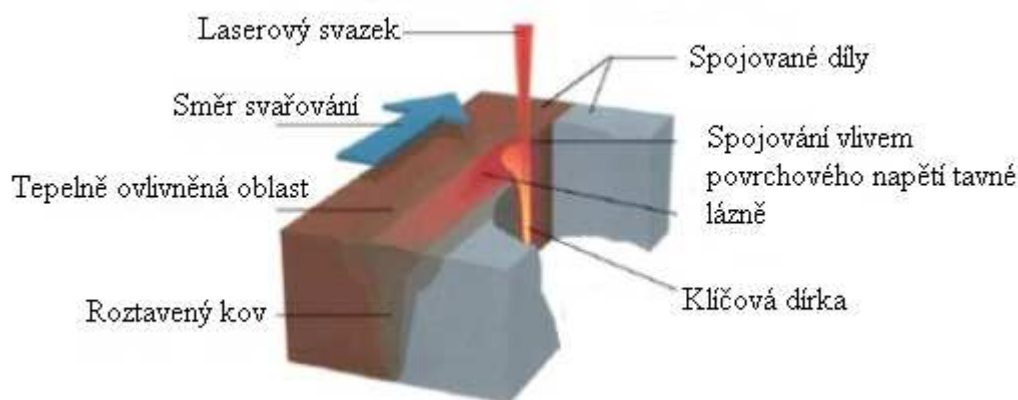
Volba netavící se wolframové elektrody závisí na druhu proudu, oblasti použití a očekávaném výsledku svařování. Elektrody se vyrábějí bez příměsí o čistotě 99,9 hm.% W, nebo jsou rovnoměrně legovány oxidy thoria, lanthanu, ceru, zirkonu nebo yttria. Přísada oxidů snižuje teplotu ohřevu elektrody o 1000 °C, zlepšuje zapalování oblouku a jeho stabilitu, zvyšuje životnost. Průměry elektrod se vyrábí od 0,5 mm do 6,4 mm o délkách 50 mm, 75 mm, 150 mm a 175 mm.[9, 10]

#### 4.1.1 Zásady pro svařování martenzitických chromových ocelí metodou 141

Při svařování martenzitických chromových ocelí metodou 141 se používá stejnosměrný proud, elektroda je na záporném pólu zdroje. Jako ochranný plyn se obvykle používá čistý argon. Pokud chceme zvýšit rychlost svařování, používá se jako ochranný plyn směs argon-helium. Jako formovací plyn se používá argon. Hodnota svařovacího proudu se volí od 30 A do 50 A na 1 mm tloušťky materiálu. Délka oblouku by měla odpovídat průměru elektrody.[9, 10]

#### 4.2 Svařování laserem (52)

Při svařování laserem je paprsek soustředěn do úzkého svazku a opticky zaostřen do ohniska miniaturních rozměrů. Prostřednictvím vysoké koncentrace výkonu (až  $10^{12} \text{ W.cm}^{-2}$ ) dochází k lokálnímu ohřevu dané oblasti do teploty varu a při vhodném zkombinování svařovacích parametrů (výkon, svařovací rychlost) dochází k efektu tzv. „klíčové dírky“. Do oblasti svaru se přivádí ochranná atmosféra argon, helium, nebo směs plynů argon-helium, která zabraňuje oxidaci a pórovitosti místa svaru. Princip laserového svařování je zobrazen na obr. 4.2.[31, 32]



Obr. 4.2 Princip laserového svařování na „klíčovou díрку“[31]



Díky tomuto procesu může laserový paprsek vytvářet svary s dobrým poměrem mezi šířkou a hloubkou průvaru.[31]

Z konstrukčního hlediska se lasery dělí do základních tří skupin:[10]

- pevnolátkové (Nd-YAG),
- plynové (CO<sub>2</sub>),
- polovodičové (diodové).

Laserovým svařovacím procesem lze vytvořit téměř všechny základní typy svarů, jaké se vytvářejí i ostatními technologiemi. Svarové plochy se připravují dělením, opracováním a upravením. Při svařování tupých spojů musí být čela materiálů co v nejtěsnějším spojení a ve stejné výšce. Optimální mezera mezi svařovanými materiály se pohybuje mezi 0,05 mm až 0,2 mm. Při větších šířkách mezery svarového spoje mohou vznikat vruby. U tenkých plechů bývá požadavek na mezeru o šířce několik tisícín mm. Vzhledem k vysoké hustotě energie nejsou na čistotu povrchu svařovaných materiálů kladeny zvláštní požadavky. Veškeré tuky a nečistoty jsou před natavením svarové lázně odpařeny.[8, 10]

Při svařování laserem lze svařovat bez přídavného materiálu nebo s přídavným materiálem ve formě drátu přidávaného do svaru nebo plnicí kovové vložky. Přídavné materiály se volí jen tehdy, pokud potřebujeme ovlivnit krystalizaci, chemické složení, nebo potřebujeme doplnit přídavným materiálem svarový kov.[32]

Lasery moderních typů lze použít jak v oblasti mikrosvařování, tak při svařování velkých tloušťek. Malá spotřeba na jednotkovou délku svaru vede ve svařovaných dílech ke snížení napětí a deformací. Výborných výsledků svařování laserem můžeme dosáhnout u vysokolegovaných ocelí.[32]

Rozsah svařovaných tloušťek se určuje dle výstupního výkonu použitého laseru. V tab. 4.1 jsou uvedeny parametry pro některé tloušťky korozivzdorných materiálů.[1]

Tab. 4.1 Svařovací parametry při svařování plynovými lasery CO<sub>2</sub>[1]

Materiál	Tloušťka materiálu [mm]	Výkon laseru [kW]	Svařovací rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]
Korozivzdorná ocel	0,5	2,0	180
	6,5	2,0	6,0
	9,5	4,0	9,6

## 5 Volba přídavných materiálů

Vhodné přídavné materiály pro martenzitické chromové oceli musí být stejného, či podobného chemického složení jako má základní materiál (důležité pokud po svařování následuje žíhání) a s velmi nízkým obsahem difuzního vodíku. Je možné také použít austenitické přídavné materiály, pokud to dovolí požadavky na mez pevnosti svarového spoje. Pro svařování velmi tuhých svařenců se doporučují slitiny Ni-Cr, nebo Ni-Cr-Fe. Tyto přídavné materiály se vyznačují výbornými plastickými vlastnostmi.[3, 5]

Při svařování martenzitické chromové oceli se doporučuje použít svařovací parametry, které zajistí, aby šířka TOO byla co nejmenší. Proto se doporučují co nejmenší průměry přídavných materiálů. Pro metodu obloukového svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (141) se používají průměry drátů 1,6 mm, 2,0 mm, 2,4 mm a 3,0 mm. Doporučené přídavné materiály s chemickým složením pro metodu 141 jsou uvedeny v tab. 5.1. V tab. 5.2 jsou pak uvedeny výsledné mechanické vlastnosti svarového kovu a v tab. 5.3 jsou uvedeny vlastnosti a použití vybraných přídavných materiálů.[5, 25, 26, 29]

Tab. 5.1 Chemické složení doporučených přídavných materiálů pro metodu 141[25, 26, 29]

Značení svařovacího drátu	Chemické složení svarového kovu [hm. %]						
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Nb
CN 13/4-IG	≤0,02	0,7	0,6	12,3	0,5	4,7	-
Thermanit 14 K	0,06	0,3	0,5	12,5	-	1,3	-
Thermanit 13/04 Si	0,02	0,7	0,7	12,3	0,5	4,7	-
AVESTA 248 SV	0,02	0,35	1,3	16,0	1,0	5,5	-
OK Tigrod 318Si	< 0,08	0,8	1,8	19,0	2,8	12,5	< 0,1

Tab. 5.2 Mechanické vlastnosti doporučených přídatných materiálů pro metodu 141[25, 26, 29]

Značení svařovacího drátu	Mechanické vlastnosti svarového kovu			
	R <sub>e</sub> [Mpa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A <sub>5</sub> [%]	KV [J]
<b>CN 13/4-IG</b>	750	830	21	150
<b>Thermanit 14 K</b>	500	650	15	50
<b>Thermanit 13/04 Si</b>	720	800	18	50
<b>AVESTA 248 SV</b>	460	840	23	75
<b>OK Tigrod 318Si</b>	460	615	35	40

Tab. 5.3 Vlastnosti a použití doporučených přídatných materiálů pro metodu 141[25, 26, 29]

Značení svařovacího drátu	Vlastnosti a použití
<b>CN 13/4-IG</b>	Pro svařování korozivzdorných martenzitických a martenziticko-feritických válcovaných, kovaných a litých materiálů. Svar se vyznačuje dobrou odolností proti korozi ve vodě, v páře, mořské vodě atd. Použití: při výrobě kotlů, vodních turbín, čerpadel atd.
<b>Thermanit 14 K</b>	Pro nerezavějící Cr (Ni) oceli a oceli na odlitky (např. 1.4008). Použití: návary těsnících ploch vodních, parních a plynových armatur, návar na nelegované a nízkolegované oceli a odlitky při provozních teplotách do 450 °C.
<b>Thermanit 13/04 Si</b>	Pro nerezavějící Cr (Ni) oceli a oceli na odlitky (např. 1.4002). Svary se vyznačují vysokou odolností proti vzniku korozních únavových trhlin.
<b>AVESTA 248 SV</b>	Pro oceli na odlitky. Svarový kov odolný proti koroznímu praskání. Použití: při výrobě čerpadel, ventilů atd.
<b>OK Tigrod 318Si</b>	Drát s nízkým obsahem uhlíku stabilizovaný niobem pro svařování nerezavějících ocelí, které jsou stabilizovány Nb nebo Ti. Svarový kov má dobrou odolnost proti mezikrystalové korozi i odolnost proti žáru až do 800 °C.

## 6 Návrh experimentálních prací

Cílem experimentálních prací bylo ověření vlastností svarových spojů dodaného oběžného kola čerpadla. Pro ověření vlastností svarových spojů byly navrženy následující destruktivní metody zkoušení:

Stanovení tvrdosti HV	- dle ČSN EN ISO 6507-1
Stanovení mikrotvrdosti HV	- dle ČSN EN ISO 6507-1
Zkouška rázem v ohybu	- dle ČSN EN 10045-1
Metalografické zkoušky	- makrostruktura svarového spoje dle ČSN EN 1321 - mikrostruktura svarového spoje dle ČSN EN 1321

## 7 Popis a vyhodnocení experimentálních prací

Oběžné kolo čerpadla bylo dodáno výrobcem průmyslových čerpadel, který si toto kolo nechal svařit externí firmou (viz obr. 7.1). Výkres oběžného kola čerpadla je zobrazen v příloze č. 1.



Obr. 7.1 Dodané oběžné kolo čerpadla

Před samotným svařováním nebyl aplikován přehřev. Svařovací parametry nebyly známy. Po svařování nebyl aplikován dohřev ani tepelné zpracování. Cílem experimentálních prací bylo proto ověřit vlastnosti svarového spoje oběžného kola čerpadla.

Metody svařování lopatek oběžného kola čerpadla:

- metodou 141 byla svařena drážka v krycím disku (tupý svar) o šířce 3,7 mm, tloušťce 4 mm a délce 1 ks drážky 120 mm (celkem 6 drážek). Drážka byla opracována hrubováním. Svařovací poloha PA. Nebylo známo, jaký byl použit přídavný materiál.
- metodou 52 byla svařena část lopatky uvnitř kola o šířce lopatky 3,7 mm a délce 1 ks lopatky 60 mm (celkem 6 lopatek). Svarová plocha měla být upravena na 1/2V svar. Svařovací poloha PB.

Chemické složení a mechanické vlastnosti základního materiálu 1.4008+QT jsou uvedeny v tab. 3.5 a v tab. 3.7. Přípona QT znamená, že základní materiál byl před samotným svařováním tepelně zpracován (zušlechtěn a kalen).

### 7.1 Příprava a označení zkušebních vzorků

Pro experimentální práce byly z lopatek oběžného kola čerpadla odebrány zkušební vzorky (viz obr. 7.2). Vzorky byly odebrány tak, aby jejich povrch nebyl ovlivněn použitou technologií dělení. Vzorky byly děleny vodním paprskem a na kotoučové pile Struers Discotom – 6 chlazené vodní emulzí. Řezy byly provedeny kolmo na plochu svarového spoje.



Obr. 7.2 Vzorky odebrané z dodaného oběžného kola čerpadla

Každý ze zkušebních vzorků je označen číslicí a velkým písmenem abecedy. Číslo značí pořadí vzorku v dané zkušební metodě. Písmenem je označena zkušební metoda nebo skupina zkušebních metod, které byly na daném vzorku (popř. vzorcích) provedeny.

### **1A, 2A, 3A**

Jedná se o tupý svarový spoj odebraný z lopatek krycího disku svařený metodou 141. Na vzorcích byla provedena zkouška mikrotvrlosti HV 1, metalografické zkoušky (makrostruktura, mikrostruktura) a bylo zjištěno chemické složení svarového kovu. Na vzorku 2A byla provedena zkouška tvrdosti HV 10.

### **1B**

Jedná se o 1/2V svar odebraný z části lopatky uvnitř disku svařený metodou 52. Na vzorku byla provedena zkouška mikrotvrlosti HV 0,1 a metalografické zkoušky (makrostruktura, mikrostruktura).

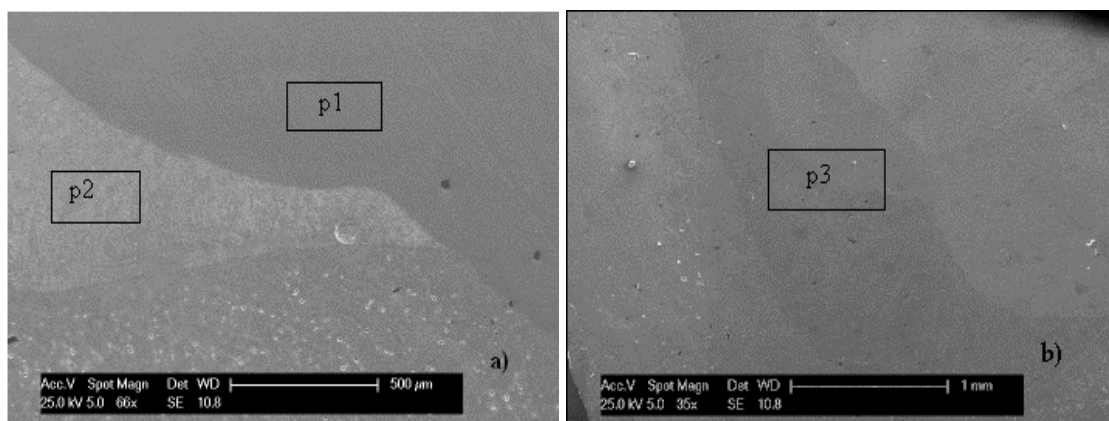
### **1KV, 2KV, 3KV**

Zkušební tyče pro zkoušku rázem v ohybu podle Charpyho byly odebraný z lopatek krycího disku svařené metodou 141. Jedná se o tupý svarový spoj.

## **7.2 Chemická analýza svarového kovu a její vyhodnocení**

Vzhledem k tomu, že nebyly dodány informace o přídavných materiálech pro metodu svařování 141, byla na vzorcích 1A, 2A a 3A provedena chemická analýza svarového kovu. Chemická analýza a fotodokumentace míst odebrané plochy pro vyhodnocení chemického složení svarového kovu byla provedena na Centru nanotechnologií, které sídlí na VŠB – TUO. Vzorky byly analyzovány na skenovacím elektronovém mikroskopu EDAX CDU LEAP DETECTOR. Tento přístroj měří pomocí rentgenového záření v prostředí vakua. Při měření byly vzorky přichyceny hliníkovou páskou.

Fotodokumentace míst odebrané plochy pro vyhodnocení chemického složení svarového kovu je zobrazena na obrázku 7.3, 7.4 a 7.5. Výsledky chemické analýzy svarového kovu byly zpracovány do tabulek (viz tab. 7.1, tab. 7.2, tab. 7.3).



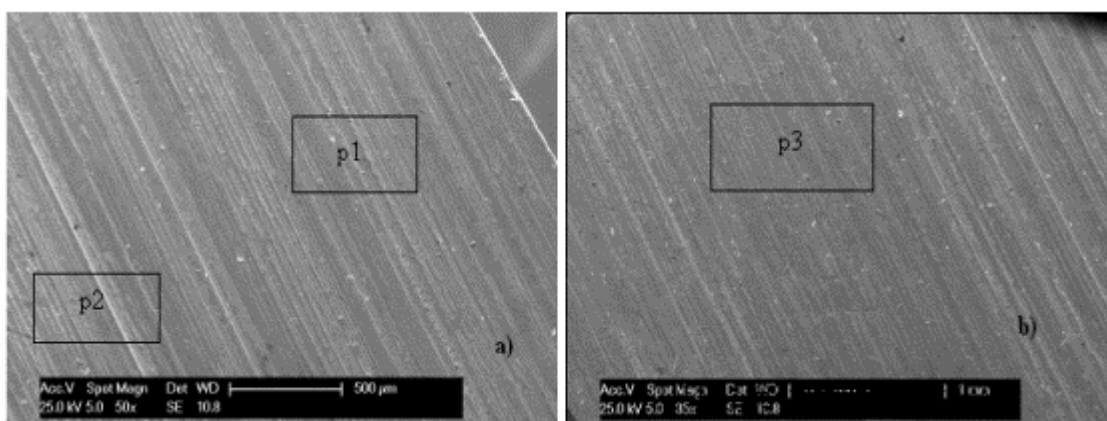
Obr. 7.3 Místa odebrané plochy vzorku 1A pro chemickou analýzu  
(a) začátek a střed svaru, b) kořenová oblast svaru)

Tab. 7.1 Chemická analýza svarového kovu vzorku 1A

Vzorek 1A								
Odebraná plocha	Chemické složení [hm. %]							
	Fe	Si	P	S	Cr	Mn	Ni	Nb
1p	24,51	0,94	0,43	0,7	17,82	-	49,27	4,7
2p	67,18	0,75	0,23	0,31	22,23	-	5,47	-
3p	62,13	0,71	0,4	0,37	22,06	1,28	8,53	-

Kde:

- 1p plocha pro chemickou analýzu odebrána z vrchní části svarového kovu,
- 2p plocha pro chemickou analýzu odebrána přibližně ze středu svarového kovu,
- 3p plocha pro chemickou analýzu odebrána z kořene svarového kovu.



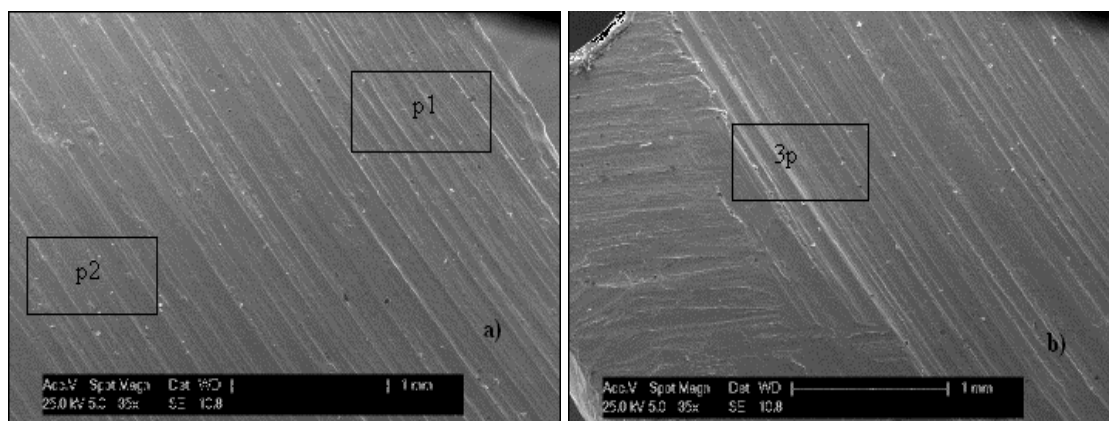
Obr. 7.4 Místa odebrané plochy vzorku 2A pro chemickou analýzu  
(a) začátek a střed svaru, b) kořenová oblast svaru)

Tab. 7.2 Chemická analýza svarového kovu vzorku 2A

Vzorek 2A								
Odebraná plocha	Chemické složení [hm. %]							
	Fe	Si	P	S	Cr	Mn	Ni	Nb
1p	15,18	0,77	0,13	0,2	16,66	2,02	53,2	2,11
2p	64,6	0,62	0,01	0,1	26,04	1,59	7,04	-
3p	73,95	0,8	0,26	0,42	14,33	0,61	1,55	-

Kde:

- 1p plocha pro chemickou analýzu odebrána z vrchní části svarového kovu,  
 2p plocha pro chemickou analýzu odebrána přibližně ze středu svarového kovu,  
 3p plocha pro chemickou analýzu odebrána z kořene svarového kovu.



Obr. 7.5 Místa odebrané plochy vzorku 3A pro chemickou analýzu  
 (a) začátek a střed svaru, b) kořenová oblast svaru)

Tab. 7.3 Chemická analýza svarového kovu vzorku 3A

Vzorek 3A								
Odebraná plocha	Chemické složení [hm. %]							
	Fe	Si	P	S	Cr	Mn	Ni	Nb
1p	17,88	0,73	0,23	0,17	16,51	2,15	53,07	1,95
2p	55,57	1,22	0,59	0,63	24,26	1,82	10,3	-
3p	67,36	1,28	0,44	0,63	20,25	1,02	9,02	-

Kde:

- 1p plocha pro chemickou analýzu odebrána z vrchní části svarového kovu,  
 2p plocha pro chemickou analýzu odebrána přibližně ze středu svarového kovu,  
 3p plocha pro chemickou analýzu odebrána z kořene svarového kovu.



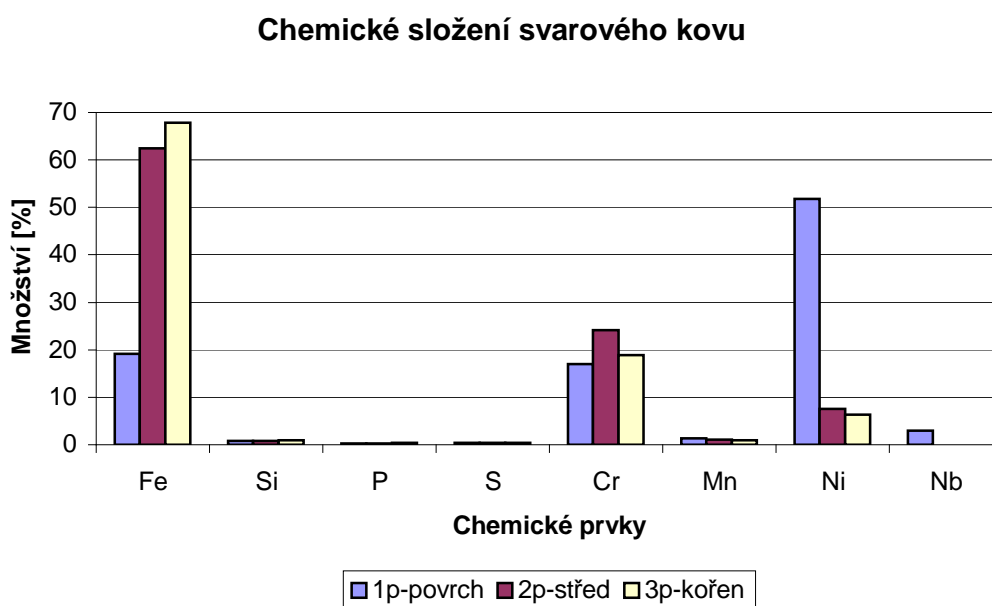
Naměřené hodnoty byly zprůměrovány (viz tab. 7.4) a následně byl z těchto hodnot pro přehlednost vypracován porovnávací graf (viz graf 7.1) s chemickým složením jednotlivých oblastí svarového kovu. Na základě chemického složení svarového kovu, byly určeny přídatné materiály, se kterými se pravděpodobně oběžné kolo svařovalo.

Tab. 7.4 Průměrné hodnoty chemického složení jednotlivých částí svarového kovu vzorků 1A, 2A a 3A

Odebraná plocha	Chemické složení [hm. %]							
	Fe	Si	P	S	Cr	Mn	Ni	Nb
1p	19,19	0,81	0,26	0,36	17,00	1,39	51,85	2,92
2p	62,45	0,86	0,28	0,35	24,18	1,14	7,60	-
3p	67,81	0,93	0,37	0,47	18,88	0,97	6,37	-

Kde:

- 1p plocha pro chemickou analýzu odebrána z vrchní části svarového kovu vzorků 1A, 2A, 3A,
- 2p plocha pro chemickou analýzu odebrána přibližně ze středu svarového kovu vzorků 1A, 2A, 3A,
- 3p plocha pro chemickou analýzu odebrána z kořene svarového kovu vzorků 1A, 2A, 3A.



Graf 7.1 Srovnání průměrného chemického složení svarového kovu vzorků 1A, 2A a 3A

Z grafu 7.1 je patrné, že svarový kov vrchní části svaru (plocha 1p) obsahuje vysoký podíl Ni. Pro tuto část svaru byl pravděpodobně použit přídatný materiál, jehož základ je tvořen Fe a obsahuje vysoký podíl Ni, nebo přídatný materiál se základem Ni.

Svarový kov střední části svaru (plocha 2p) a kořenové části svaru (plocha 3p) vykazují podobné chemické složení s vysokým obsahem Cr. Lze tak usuzovat, že střed svaru a kořen svaru byly svařeny stejným přídatným materiálem, jehož základ je tvořen Fe a obsahuje vysoký podíl Cr.

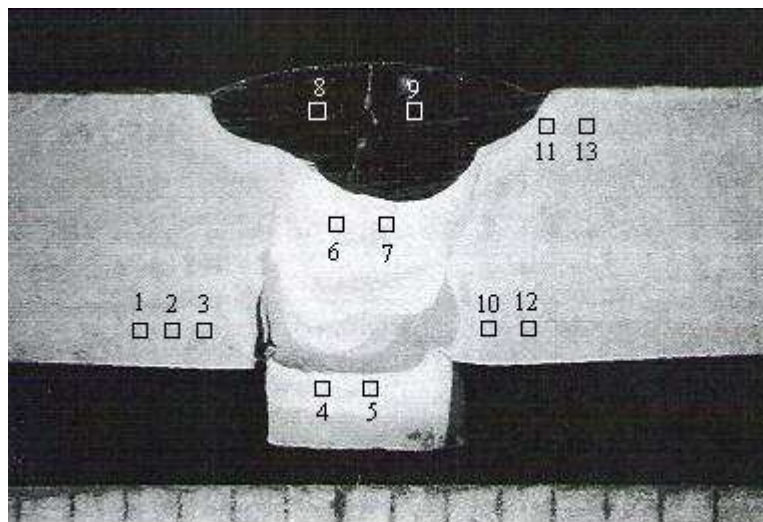
V tab. 7.5 jsou uvedeny pravděpodobné přídatné materiály s chemickým složením pro jednotlivé části svarového kovu.

Tab. 7.5 Chemické složení vybraných přídatných materiálů pro metodu 141[25]

Část svaru	Značení svařovacího drátu	Chemické složení svarového kovu [hm. %]						
		Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb
1p	UTP A 068 HH	0,8	<0,02	<0,02	3,0	20,0	základ	2,7
	UTP A 2133 Mn	základ	0,12	0,3	4,5	21,0	33	1,2
2p	Thermanit JE-308L	základ	0,02	0,5	1,7	20,0	10,0	-
3p								

### 7.3 Zkouška tvrdosti a její vyhodnocení

Zkouška tvrdosti dle Vickerse byla provedena na vzorku 2A dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Zkouška tvrdosti byla provedena v akreditované laboratoři na zkušebním zařízení Briviskop BVR 187.5 M-D, při teplotě 20 °C a při zatížení HV 10. Na obr. 7.6 jsou zobrazena místa, kde bylo provedeno měření tvrdosti. Výsledné tvrdosti byly zaznamenány do tab. 7.6.



Obr. 7.6 Schématické umístění vpichů pro měření tvrdosti vzorku 2A

Tab. 7.6 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku 2A

Vzorek 2A		
Číslo vpichu	Umístění vpichu	Tvrдость HV 10
1	ZM	301
2	ZM	281
3	TOO	262
4	TOO kořenové oblasti	461
5	TOO kořenové oblasti	377
6	SK	320
7	SK	296
8	SK	202
9	SK	182
10	TOO	314
11	TOO	464
12	ZM	170
13	ZM	253

Základní materiál svarového spoje oběžného kola čerpadla – ocel 1.4008+QT náleží dle TNI CEN ISO/TR 15608:2008 do skupiny materiálu 7.2. Skupina materiálů 7.2 nemá dle normy ČSN EN ISO 15614-1 stanovenou maximální přípustnou hodnotu tvrdosti. Kritérium pro maximální tvrdost svarového spoje oběžného kola čerpadla v tepelně nezpracovaném stavu bylo dohodnuto se zákazníkem na hodnotě 350 HV 10.

Hodnoty naměřené ve vrchní části svarového kovu vykazují v průměru 192 HV 10. Ve střední části svarového kovu je průměrná hodnota tvrdosti 308 HV 10. Naměřené hodnoty TOO se pohybují v rozmezí od 262 HV 10 do 464 HV 10. Hodnota tvrdosti základního materiálu se pohybuje v rozmezí od 170 HV 10 do 301 HV 10.

Z tab. 7.6 vyplývá, že hodnota tvrdosti překročila maximální přípustnou hodnotu 350 HV 10 v TOO.

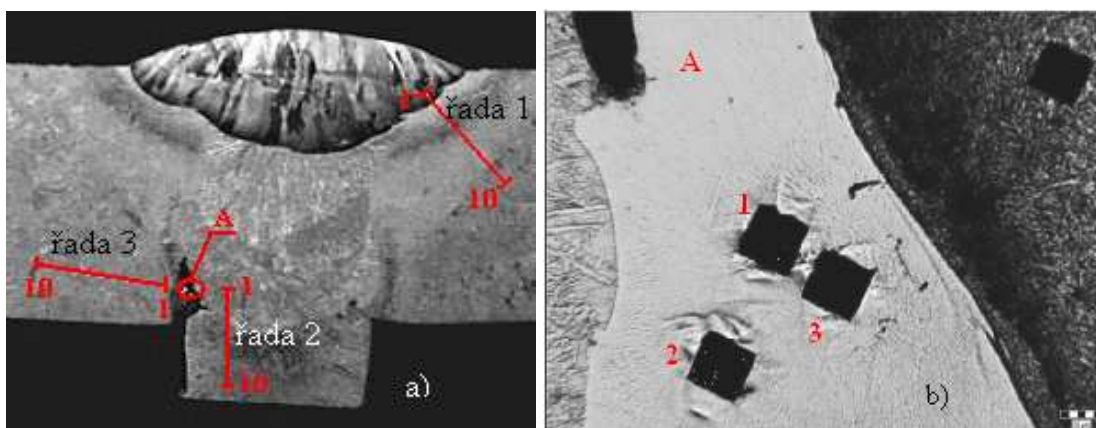
#### 7.4 Zkouška mikrotvrdosti a její vyhodnocení

Zkouška mikrotvrdosti svarových spojů dle Vickerse byla měřena na zkušebních vzorcích 1A, 2A, 3A a 1B dle normy ČSN EN ISO 6507-1.

Mikrotvrdost vzorků 1A, 2A a 3A byla měřena v laboratoři VŠB – TUO. Vzorky 1A, 2A a 3A byly analyzovány na mikrotvrdoměru Leco MICROHARDNESS TESTER LM 247 AT. Zkušební teplota 20 °C, zatížení HV 1. Vzdálenost mezi jednotlivými vpichy byla 250 μm.

Mikrotvrdost vzorku 1B byla měřena v akreditované laboratoři na mikrotvrdoměru LECO AMH 43, při teplotě 20 °C a při zatížení HV 0,1.

Naměřené hodnoty vzorků 1A, 2A, 3A a 1B byly zaznamenány do příslušných tabulek (viz tab. 7.7, tab. 7.8, tab. 7.9, tab. 7.10, tab. 7.11). Fotodokumentace míst umístěných vpichů na vzorcích 1A, 2A, 3A (viz obr. 7.7, obr. 7.8, obr. 7.9) byla provedena na zařízení OLYMPUS a NOPHOT 21. Na obr. 7.10 je zobrazeno umístění vpichů vzorku 1B.



Obr. 7.7 Schéma umístění vpichů mikrotvrdosti vzorku 1A

(a) rozmístění vpichů na celém vzorku 1A,

b) detail oblasti A – rozmístění vpichů v místě trhliny)

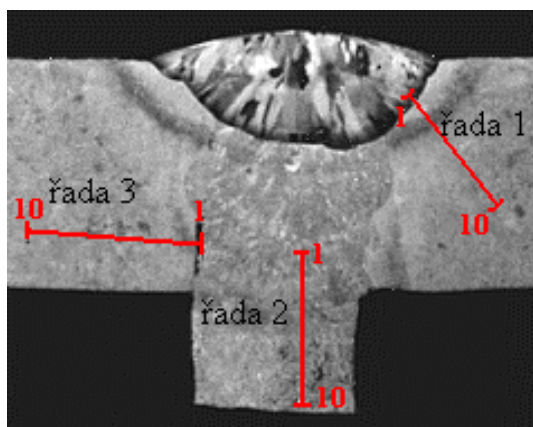
Tab. 7.7 Naměřené hodnoty mikrotvrdosti vzorku 1A

Vzorek 1A						
Číslo vpichu	Řada vpichů č. 1		Řada vpichů č. 2		Řada vpichů č. 3	
	Umístění vpichu	Mikrotvrdost tvrdost HV 1	Umístění vpichu	Mikrotvrdost tvrdost HV 1	Umístění vpichu	Mikrotvrdost tvrdost HV 1
1	SK	191	SK	243	TOO	237
2	TOO	481	SK	274	TOO	278
3	TOO	459	SK	264	ZM	264
4	TOO	357	SK	284	ZM	237
5	TOO	430	TOO	398	ZM	242
6	TOO	426	TOO	402	ZM	240
7	TOO	397	TOO	325	ZM	247
8	TOO	389	TOO	297	ZM	251
9	ZM	361	TOO	295	ZM	255
10	ZM	252	ZM	269	ZM	256

Tab. 7.8 Naměřené hodnoty mikrotvrdosti svarového kovu vzorku 1A – v místě trhliny

Vzorek 1A		
Číslo vpichu	Vpichy A	
	Umístění vpichu	Mikrotvrdost HV 1
1	SK	236
2	SK	252
3	SK	248

Mikrotvrdost základního materiálu vzorku 1A se pohybuje v rozmezí od 237 HV 1 do 361 HV 1. Mikrotvrdost TOO se pohybuje v rozmezí od 237 HV 1 do 481 HV 1. Mikrotvrdost vrchního návaru je 191 HV 1. Průměrná mikrotvrdost střední a kořenové části svarového kovu je 257 HV 1. Maximální přípustná hodnota tvrdosti 350 HV 1 byla u vzorku 1A překročena v TOO.

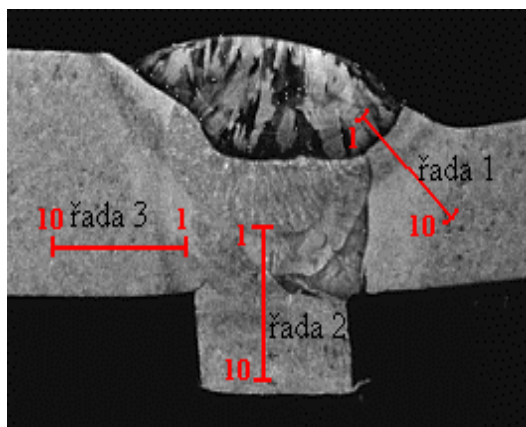


Obr. 7.8 Schéma umístění vpichů mikrotvrdosti vzorku 2A

Tab. 7.9 Naměřené hodnoty mikrotvrdomosti vzorku 2A

Vzorek 2A						
Číslo vpichu	Řada vpichů č. 1		Řada vpichů č. 2		Řada vpichů č. 3	
	Umístění vpichu	Mikrotvrdomost tvrdost HV 1	Umístění vpichu	Mikrotvrdomost HV 1	Umístění vpichu	Mikrotvrdomost tvrdost HV 1
1	SK	193	SK	208	SK	269
2	TOO	512	SK	222	SK	271
3	TOO	335	TOO	557	TOO	348
4	TOO	399	TOO	562	TOO	274
5	TOO	368	TOO	566	ZM	269
6	TOO	394	TOO	430	ZM	239
7	TOO	339	TOO	447	ZM	247
8	ZM	282	TOO	458	ZM	251
9	ZM	232	TOO	470	ZM	250
10	ZM	235	TOO	479	ZM	252

Mikrotvrdomost základního materiálu vzorku 2A se pohybuje v rozmezí od 232 HV 1 do 282 HV 1. Mikrotvrdomost TOO se pohybuje v rozmezí od 274 HV 1 do 566 HV 1. Mikrotvrdomost vrchního návaru je 193 HV 1. Průměrná mikrotvrdomost střední a kořenové části svarového kovu je 243 HV 1. Maximální přípustná hodnota tvrdosti 350 HV 1 byla u vzorku 2A překročena v TOO.

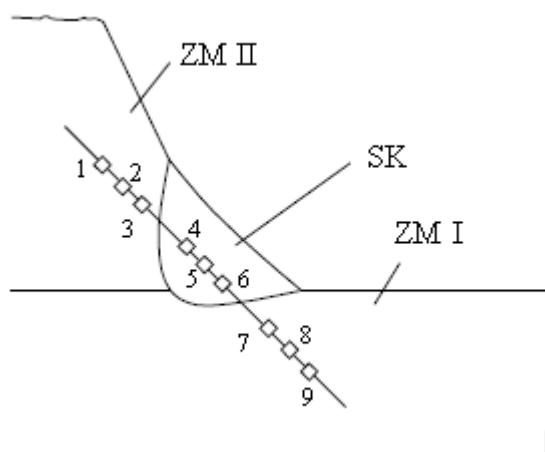


Obr. 7.9 Schéma umístění vpichů mikrotvrdomosti vzorku 3A

Tab. 7.10 Naměřené hodnoty mikrotvrdosti vzorku 3A

Vzorek 3A						
Číslo vpichu	Řada vpichů č. 1		Řada vpichů č. 2		Řada vpichů č. 3	
	Umístění vpichu	Mikrotvrdost tvrdost HV 1	Umístění vpichu	Mikrotvrdost HV 1	Umístění vpichu	Mikrotvrdost HV 1
1	SK	177	SK	222	SK	362
2	TOO	426	SK	237	SK	373
3	TOO	420	SK	341	TOO	321
4	TOO	407	SK	312	TOO	331
5	TOO	405	TOO	379	TOO	329
6	TOO	434	TOO	326	ZM	558
7	ZM	409	TOO	279	ZM	470
8	ZM	370	TOO	242	ZM	509
9	ZM	260	TOO	233	ZM	525
10	ZM	242	TOO	238	ZM	520

Mikrotvrdost základního materiálu vzorku 3A se pohybuje v rozmezí od 242 HV 1 do 558 HV 1. Mikrotvrdost TOO se pohybuje v rozmezí od 233 HV 1 do 433 HV 1. Mikrotvrdost vrchního návaru je 177 HV 1. Průměrná mikrotvrdost střední a kořenové části svaru je 308 HV 1. Maximální přípustná hodnota tvrdosti 350 HV 1 byla u vzorku 3A překročena v TOO a v ZM.



Obr. 7.10 Schéma umístění vpichů mikrotvrdosti vzorku 1B

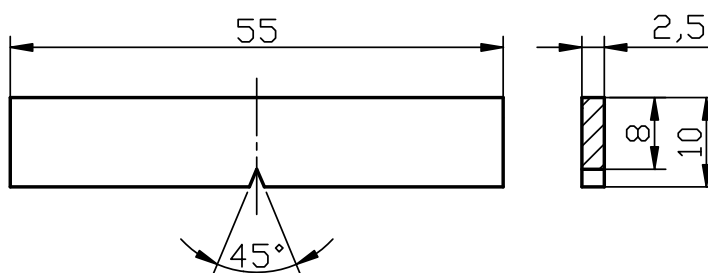
Tab. 7.11 Naměřené hodnoty mikrotvrdosti vzorku 1B

Vzorek 1D		
Číslo vpichu	Umístění vpichu	Mikrotvrdost HV 0,1
1	ZM	262
2	ZM	258
3	ZM	268
4	SK	276
5	SK	263
6	SK	268
7	ZM	260
8	ZM	257
9	ZM	265

Mikrotvrdost základního materiálu vzorku 1B se pohybuje v rozmezí od 257 HV 0,1 do 268 HV 0,1. Průměrná mikrotvrdost svarového kovu je 269 HV 0,1. Maximální přípustná hodnota tvrdosti 350 HV 0,1 nebyla u vzorku 1B v žádné části svarového kovu překročena.

### 7.5 Zkouška rázem v ohybu a její vyhodnocení

Zkouška rázem v ohybu byla provedena dle normy ČSN EN 10045-1. Pro zkoušku rázem v ohybu byla použita zkušební tyč s V – vrubem o nestandardních rozměrech 2,5x10x55 mm. Zkušební vzorky byly odebrány ze svarového kovu – VWT a označeny 1KV, 2KV a 3KV. Zkouška rázem v ohybu byla provedena v akreditované laboratoři na zkušebním zařízení PSW 300 AF, při teplotě 20 °C. Rozměry nestandardní zkušební tyče jsou zobrazeny na obr. 7.11. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 7.12.



Obr. 7.11 Rozměry nestandardní zkušební tyče



Tab. 7.12 Výsledné hodnoty zkoušky rázem v ohybu

Zkušební tyč	Teplota [°C]	Nárazová práce [J]	Vrubová houževnatost [ $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]
1KV	20 °C	5	25
2KV	20 °C	4	20
3KV	20 °C	7	35
<b>Průměrná hodnota</b>		<b>5</b>	<b>28</b>

Požadavek na minimální hodnotu nárazové práce pro základní materiál 1.4008+QT je 27 J při teplotě 20 °C (viz tab. 3.7). U svarového spoje oběžného kola čerpadla byly zjištěny ve svarovém kovu nízké hodnoty nárazové práce o průměru 5 J při teplotě 20 °C. Z výsledků je proto patrné, že svarový kov nesplňuje požadavky na minimální hodnotu nárazové práce pro základní materiál.

### 7.6 Makrostruktura svarového spoje a její vyhodnocení

Makroskopická kontrola svarového spoje byla provedena na vzorcích 1A, 2A, 3A a 1B (viz obr. 7.2) dle normy ČSN EN 1312. Makrostruktura naleptaného svaru byla posouzena vizuálně při zvětšení 2x, 3,5x a 4x.

Makrostruktura svarového spoje vzorků 1A, 2A a 3A byla provedena v laboratořích VŠB – TUO. Pro naleptání vzorků na makrostrukturu bylo použito leptadlo dle Adler-Mattinga. Fotodokumentace makrostruktury vzorků 1A, 2A a 3A (viz obr.7.12, 7.13, 7.14) byla provedena zařízením OLYMPUS.



Obr. 7.12 Makrostruktura svarového kovu vzorku 1A – zvětšeno 4x

V horní oblasti svarového kovu vzorku 1A se vyskytují vnitřní trhliny o velikosti až 1,0 mm a vnitřní pór. Ve svarovém kovu se dále nacházejí vnitřní trhliny. V kořenové oblasti svarového kovu se nachází povrchová trhlina a neprovařený kořen.



Obr. 7.13 Makrostruktura svarového kovu vzorku 2A – zvětšeno 3,5x

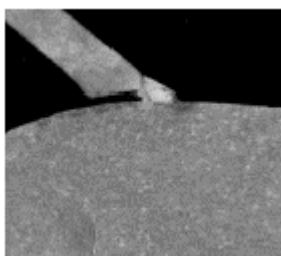
V horní oblasti svarového kovu vzorku 2A se vyskytují vnitřní trhliny o velikosti až 0,64 mm. Ve svarovém kovu se dále vyskytují vnitřní póry o průměru až 0,49 mm. V kořenové oblasti svaru se nachází povrchová trhlina a neprovařený kořen.



Obr. 7.14 Makrostruktura svarového kovu vzorku 3A – zvětšeno 3,5x

V horní oblasti svarového kovu vzorku 3A se vyskytují vnitřní trhliny o velikosti až 0,78 mm, vnitřní póry o velikosti až 0,29 mm. V kořenové oblasti svaru se nachází povrchová trhlina.

Makrostruktura svarového spoje vzorku 1B byla provedena v akreditované laboratoři. Pro naleptání vzorku na makrostrukturu bylo použito leptadlo dle Adler-Mattinga. Makrostruktura svarového spoje (viz obr. 7.15) byla provedena na zařízení 946.20/021.



Obr. 7.15 Makrostruktura vzorku 1B – zvětšeno 2x

Ve svarovém kovu se vyskytují vnitřní trhliny o velikosti až 0,2 mm. Z obrázku 7.15 je patrné špatné sestavení koutového svaru,  $h = 0,5$  mm.

Vady vzorků 1A, 2A, 3A a 1B jsou zdokumentovány v příloze č. 2. Na základě makrostruktury vzorků 1A, 2A, 3A a 1B jsou všechny svarové spoje nevyhovující pro všechny stupně jakosti dle ČSN EN ISO 5817.

### 7.7 Mikrostruktura svarového spoje a její vyhodnocení

Mikroskopická kontrola svarového spoje byla provedena na vzorcích 1A, 2A, 3A a 1B dle normy ČSN EN 1312. Mikrostrukturním rozbořem byly studovány svarový kov, TOO a základní materiál svarového spoje. Mikrostruktura naleptaného svaru byla posouzena pod mikroskopem při zvětšení 50x až 500x.

Mikrostruktura svarového spoje vzorků 1A, 2A a 3A byla provedena v laboratořích na VŠB – TUO. Pro naleptání vzorků na mikrostrukturu bylo použito leptadlo dle VILLELA. Fotodokumentace mikrostruktury vzorků 1A, 2A a 3A (viz obr.7.16, 7.17, 7.18) byla provedena zařízením NOPHOT 21.

Na obrázku 7.16 je zdokumentována mikrostruktura svarového kovu vzorků 1A, 2A a 3A, která je tvořena feritem a karbidy. Struktura TOO je tvořena popuštěným martenzitem.



Obr. 7.16 Svarový kov, hranice ztavení, TOO – zvětšeno 500x

Struktura TOO v kořenové části svarového kovu vzorků 1A, 2A a 3A je tvořena popuštěným martenzitem a útvary feritu (viz obr. 7.17).



Obr. 7.17 TOO kořenové oblasti svarového kovu – zvětšeno 200x

Obrázek 7.18 dokumentuje strukturu základního materiálu, která je tvořena popuštěným martenzitem.



Obr. 7.18 Základní materiál – zvětšeno 200x

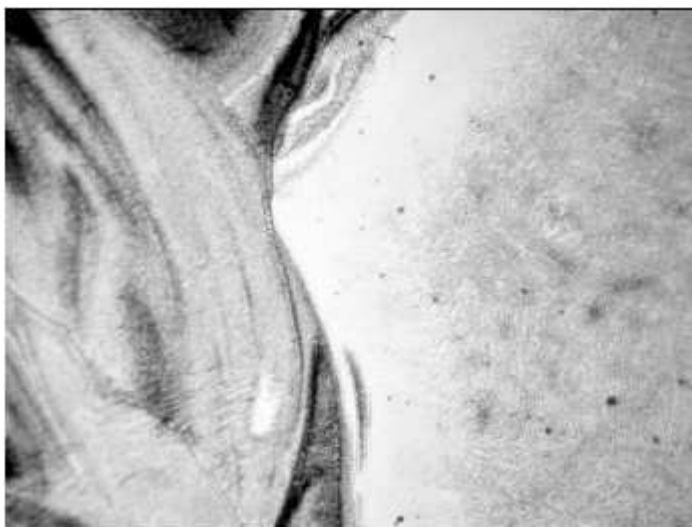
Mikrostruktura svarového spoje vzorku 1B byla provedena v akreditované laboratoři. Mikrostruktura svarového spoje byla posuzována v oblastech označených na obrázku 7.10. Vzorek 1B byl leptán na mikrostrukturu elektrolyticky 4%  $\text{H}_2\text{CrO}_4$ . Mikrostruktura svarového spoje byla provedena na zařízení NK 946.20/001.

Mikrostrukturu svarového kovu tvoří směs základních struktur (viz obr. 7.19).



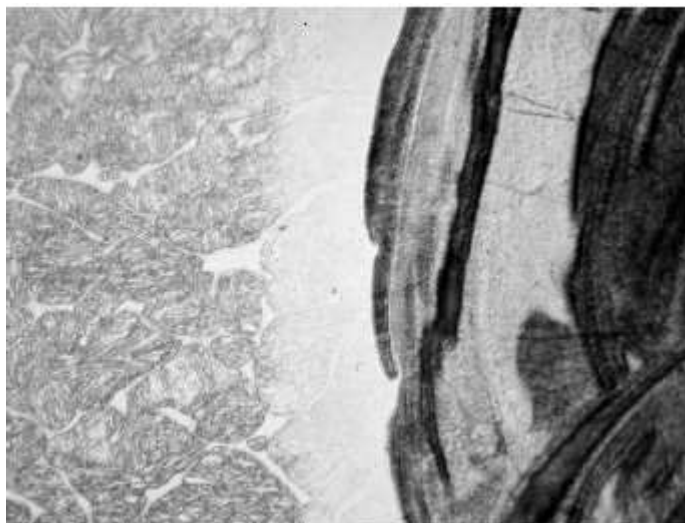
Obr. 7.19 Zakalená struktura svarového kovu – zvětšeno 50x

Na obrázku 7.20 je zobrazena mikrostruktura u hranice ztavení I základního materiálu. Tato struktura byla identifikována jako bainitická.



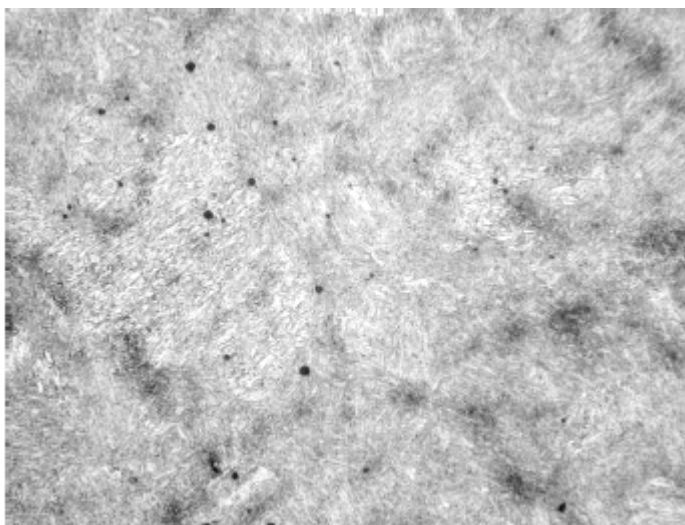
Obr. 7.20 Hranice ztavení I – zvětšeno 200x

Hranice ztavení II základního materiálu je tvořena popuštěným martenzitem a útvary cementitu a feritu (viz obr. 7.21).



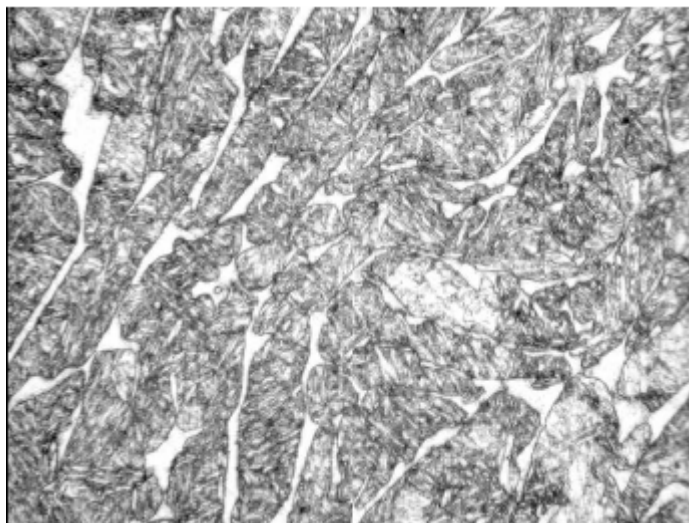
Obr. 7.21 Hranice ztavení II – zvětšeno 200x

Obrázek 7.22 dokumentuje základní materiál I, jehož struktura je bainitická.



Obr. 7.22 Základní materiál I – zvětšeno 200x

Na obrázku 7.23 je zobrazen základní materiál II, jehož mikrostrukturu tvoří popuštěný martenzit a útvary cementitu a feritu.



Obr. 7.23 Základní materiál II – zvětšeno 200x

## 8 Návrh optimalizace technologie svařování oběžného kola

Na základě zjištěných nevyhovujících vlastností svarového spoje dodaného oběžného kola čerpadla byl proveden nový návrh technologie svařování oběžného kola. Cílem bylo navrhnout technologii svařování, parametry, přídatný materiál a tepelné zpracování tak, aby výsledné hodnoty nedestruktivních a destruktivních zkoušek svarového spoje byly vyhovující.

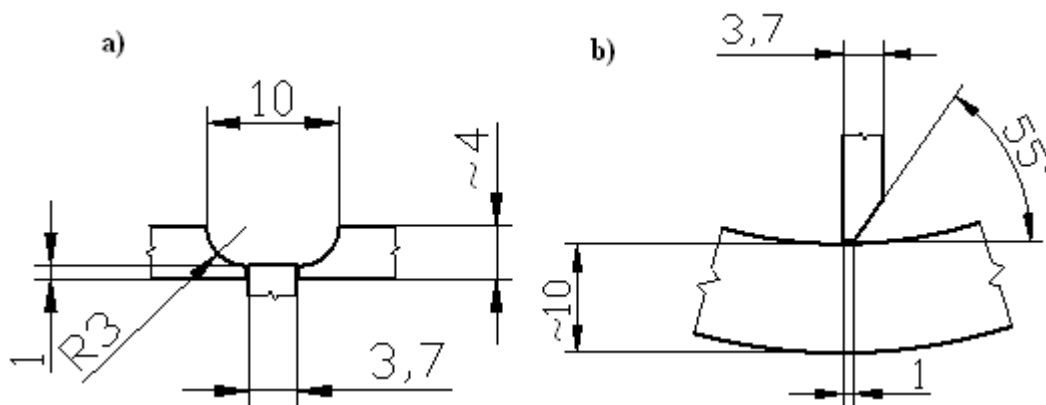
### 8.1 Návrh experimentálních prací

Návrh technologie svařování a realizace svařování oběžného kola

Nedestruktivní zkoušky	- Penetrační zkouška dle ČSN EN 571-1
Destruktivní zkoušky	- Stanovení tvrdosti HV dle ČSN EN ISO 6507-1
	- Zkouška rázem v ohybu dle ČSN EN 10045-1
	- Makrostruktura svarového spoje dle ČSN EN 1321
	- Mikrostruktura svarového spoje dle ČSN EN 1321

## 8.2 Návrh technologie svařování a realizace svařování oběžného kola

Části oběžného kola čerpadla z martenzitické chromové oceli 1.4008+QT byly dodány výrobcem průmyslových čerpadel. Následně byly svařeny metodou 141 ve svařovně VŠB – TUO. Před svařováním oběžného kola byly svarové plochy opracovány na tupý U spoj a 1/2 V spoj – částečně provařený (viz obr. 8.1).



Obr. 8.1 Schéma spoje (a) U svar, b) 1/2V svar)

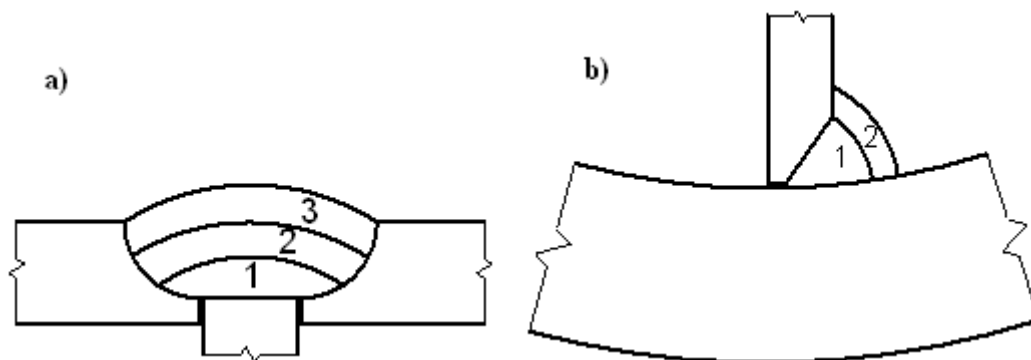
Teplota předehřevu byla zvolena na úrovni 200 °C. Maximální teplota interpass byla zvolena na úrovni 300 °C. Teplota dohřevu byla zvolena na 250 °C/1h. Předehřev a dohřev byl aplikován v žíhací peci LAC – PK 225/12.

Pro svařování oběžného kola čerpadla obou typů svarů metodou 141 byl použit přídatný materiál drát CN 13/4-IG (značení dle EN ISO 14343-B: SSZ410NiMo) od výrobce Böhler. Chemické složení a mechanické vlastnosti přídatného materiálu je uvedeno v tab. 5.1 a v tab. 5.2. Během svařování byl použit ochranný a formovací plyn Arcal TIG – MIG (skupina dle ČSN EN ISO 14175-II), výrobce Air Liquide o průtokovém množství 12 l/min a 6 l/min.

Pro svařování oběžného kola čerpadla obou typů svarů bylo použito zařízení REHM Invertig 230 GW, svařovací parametry byly měřeny multimetrem OMEGA HHM599 a teplotní režim svařování byl kontrolován kontaktním dotykovým teploměrem OMEGA HH22.

Schéma postupu svařování je zobrazeno na obrázku 8.2. Parametry svařování tupého U svaru a 1/2 V svaru jsou uvedeny v tab. 8.1 a v tab. 8.2.





Obr. 8.2 Postup svařování (a) U svar, b) 1/2V svar)

Tab. 8.1 Parametry svařování tupého U svaru

U svar – poloha svařování PA						
Svarová housenka	Průměr [mm]	Proud I [A]	Napětí U [V]	Typ proudu / polarita	Rychlost svařování v [mm·s <sup>-1</sup> ]	Tepelný příkon Q [kJ·mm <sup>-1</sup> ]
1	1,6	104 – 106	10 – 11	DC / -	0,83	0,75 – 0,84
2	2,4	96 – 98	10 – 11	DC / -	0,67	0,86 – 0,97
3	2,4	125 – 127	12 – 13	DC / -	0,49	1,84 – 2,02

Tab. 8.2 Parametry svařování 1/2 V svaru

1/2 V svar – poloha svařování PB						
Svarová housenka	Průměr [mm]	Proud [A]	Napětí [V]	Typ proudu / polarita	Rychlost svařování [mm·s <sup>-1</sup> ]	Tepelný příkon [kJ·mm <sup>-1</sup> ]
1	--	126 – 127	13 – 14	DC / -	0,42	2,34 – 2,54
2	1,6	105 – 107	11 – 12	DC / -	0,64	1,08 – 1,20

Tepelný příkon byl vypočten dle rovnice 8.1, koeficient tepelné účinnosti pro metodu 141 je  $k = 0,6$ . [2]

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad (8.1)$$

Na obr. 8.3 je uveden výsledný svarový spoj oběžného kola čerpadla.



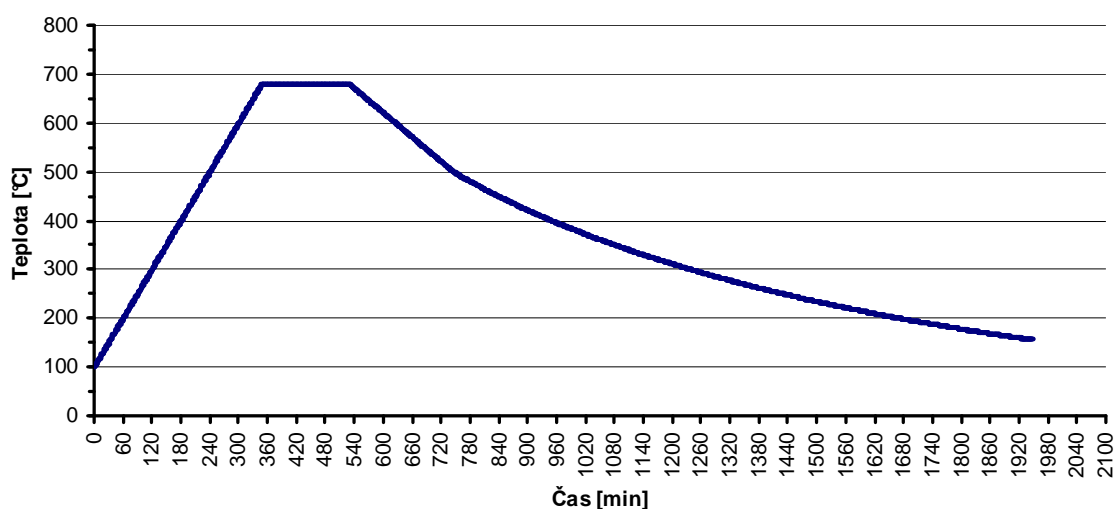
Obr. 8.3 Oběžné kolo čerpadla

Po svařování bylo aplikováno tepelné zpracování. Pro aplikaci tepelného zpracování po svařování byla použita žíhací pec LAC – PK 225/12. Parametry procesu tepelného zpracování svarového spoje oběžného kola čerpadla jsou uvedeny v tab. 8.3. Časový průběh tepelného zpracování je uveden v grafu 8.1.

Tab. 8.3 Parametry procesu tepelného zpracování

Rychlost ohřevu	100 °C/h
Teplota/Čas výdrže	680 °C/3h
Rychlost ochlazování	50 – 70 °C/h

Časový průběh tepelného zpracování



Graf 8.1 Časový průběh teploty při tepelném zpracování

### 8.3 Penetrační zkouška a její vyhodnocení

Penetrační zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 571-1. Na povrch očištěného oběžného kola byl nanesen penetrační prostředek a vývojka. Po určité době se na bílé vyvolávací vrstvě objevily barevné stopy vad (viz obr. 8.4).

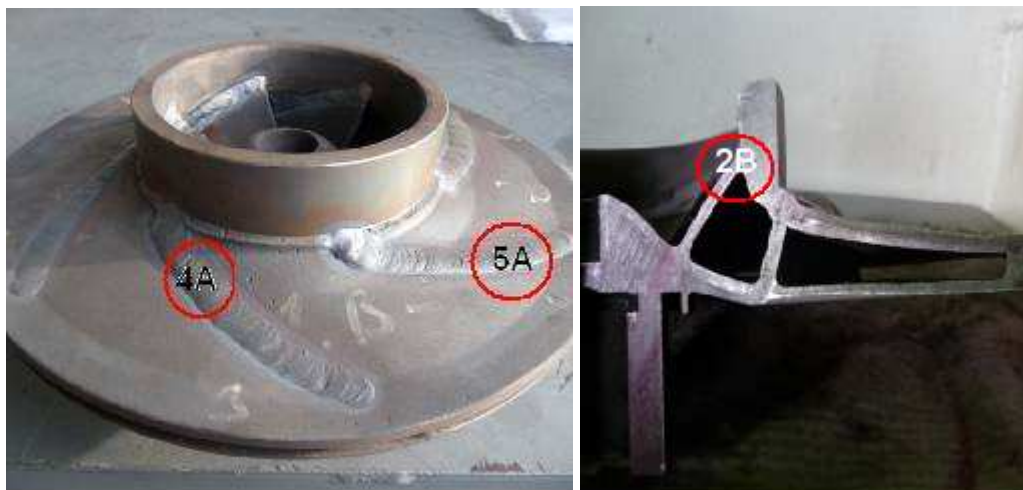


Obr. 8.4 Indikace vad oběžného kola čerpadla – penetrační zkouška

Na povrchu svarového kovu nebyly identifikovány žádné vady. Na základním materiálu byly indikovány povrchové vady odlitku (otevřené póry a bubliny).

### 8.4 Příprava a označení zkušebních vzorků

Pro destruktivní zkoušky byly z lopatek oběžného kola čerpadla odebrány zkušební vzorky (viz obr. 8.5). Vzorky byly děleny na pásové pile ARG 130 TK a kotoučové pile Struers Discotom – 6 chlazené vodní emulzí. Řezy byly provedeny kolmo na plochu svarového spoje.



Obr. 8.5 Vzorky odebrané z oběžného kola čerpadla

Každý ze zkušebních vzorků je označen číslicí a velkým písmenem abecedy. Vzorky odebrané z oběžného kola čerpadla svařené novým technologickým postupem navazují číselnou řadou na vzorky z předchozí technologie svařování.

#### **4A, 5A**

Jedná se o tupý U svar odebraný z lopatek krycího disku svařený metodou 141. Na vzorcích byla provedena zkouška tvrdosti HV 10 a metalografické zkoušky (makrostruktura, mikrostruktura).

#### **2B**

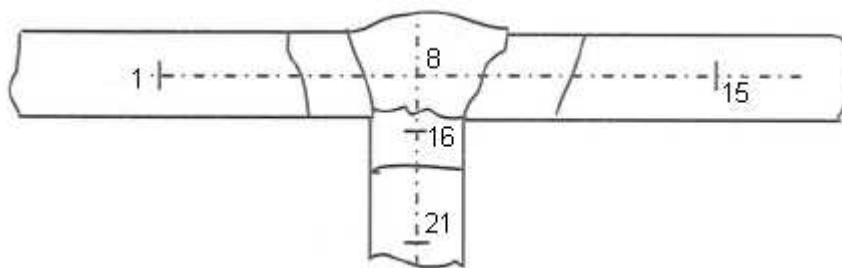
Jedná se o 1/2 V svar s částečným průvarem, odebraný z části lopatky uvnitř disku svařený metodou 141. Na vzorku byly provedeny metalografické zkoušky (makrostruktura, mikrostruktura).

#### **4KV, 5KV, 6KV**

Zkušební tyče pro zkoušku rázem v ohybu podle Charpyho byly odebraný z lopatek krycího disku svařené metodou 141. Jedná se o tupý U svar.

### **8.5 Zkouška tvrdosti a její vyhodnocení**

Zkouška tvrdosti dle Vickerse byla provedena na vzorku 4A a 5A dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Zkouška tvrdosti byla provedena v akreditované laboratoři na zkušebním zařízení Briviskop BVR 187.5 M-D, při teplotě 20 °C a při zatížení HV 10. Na obrázku 8.6 jsou zobrazena místa, kde bylo provedeno měření tvrdosti. Výsledné tvrdosti byly zaznamenány do tab. 8.4.

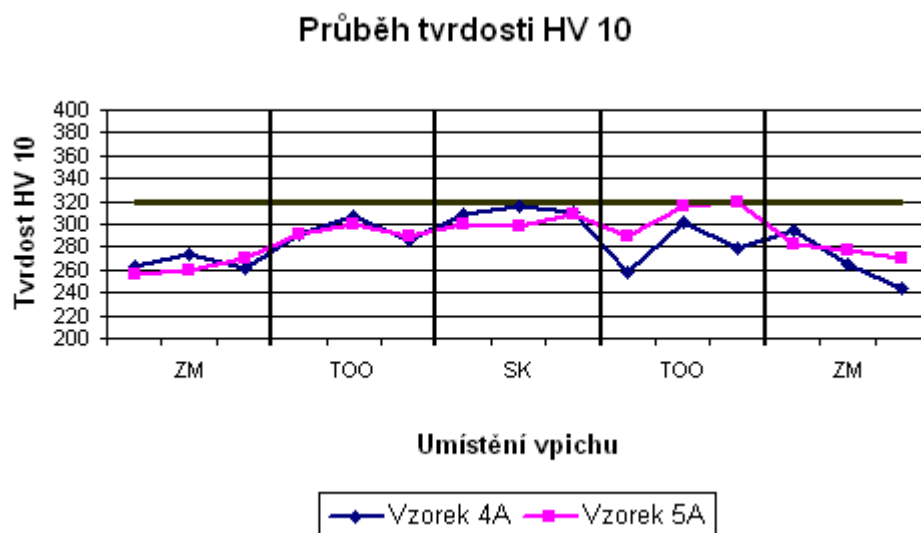


Obr. 8.6 Schématické umístění vpichů pro měření tvrdosti vzorků 4A a 5A

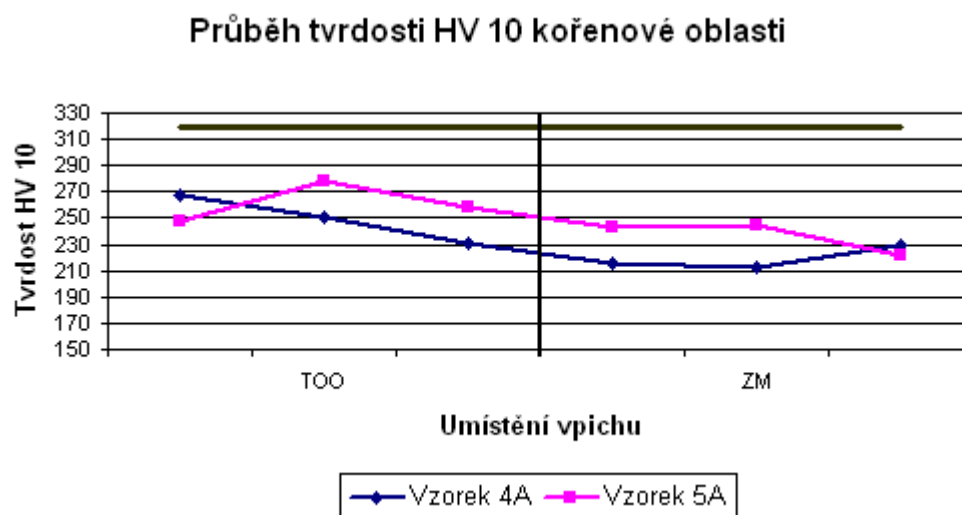
Tab. 8.4 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků 4A a 5A

Číslo vpichu	Umístění vpichu	Tvrdost HV 10 vzorek 4A	Tvrdost HV 10 vzorek 5A
1	ZM	263	256
2	ZM	273	260
3	ZM	262	271
4	TOO	292	292
5	TOO	307	300
6	TOO	286	289
7	SK	308	300
8	SK	316	298
9	SK	311	308
10	TOO	258	290
11	TOO	302	316
12	TOO	279	320
13	ZM	294	283
14	ZM	265	278
15	ZM	244	271
16	TOO	267	247
17	TOO	250	278
18	TOO	231	258
19	ZM	215	243
20	ZM	213	244
21	ZM	230	222

Průběhy tvrdosti jsou pro přehlednost zobrazeny v grafech 8.2 a 8.3. Na grafu 8.2 je zobrazen průběh tvrdosti HV 10 zahrnující obě části ZM, TOO a SK (vpichy číslo 1 až 15). Na grafu 8.3 je znázorněn průběh tvrdosti HV 10 kořenové oblasti svaru, který zahrnuje TOO a ZM (vpichy číslo 16 až 21). Kritérium pro maximální tvrdost svarového spoje oběžného kola čerpadla v tepelně zpracovaném stavu bylo dohodnuto se zákazníkem na hodnotě 320 HV 10.



Graf 8.2 Průběh tvrdosti HV 10 vzorků 4A a 5A



Graf 8.3 Průběh tvrdosti HV 10 kořenové oblasti vzorků 4A a 5A

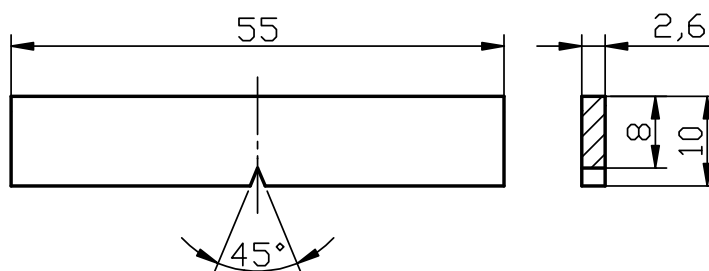
Hodnoty naměřené ve svarovém kovu vzorku 4A vykazují v průměru 312 HV 10. Naměřené hodnoty TOO se pohybují v rozmezí od 231 HV 10 do 307 HV 10. Hodnota tvrdosti základního materiálu se pohybuje v rozmezí od 230 HV 10 do 294 HV 10. Z grafu 8.2 a grafu 8.3 vyplývá, že hodnota tvrdosti vzorku 4A nepřekročila maximální přípustnou hodnotu 320 HV 10 v žádné oblasti (ZM, TOO, SK).

Hodnoty naměřené ve svarovém kovu vzorku 5A vykazují v průměru 302 HV 10. Naměřené hodnoty TOO se pohybují v rozmezí od 247 HV 10 do 320 HV 10. Hodnota tvrdosti základního materiálu se pohybuje v rozmezí od 222 HV 10 do 283 HV 10.

Z grafu 8.2 a grafu 8.3 vyplývá, že hodnota tvrdosti vzorku 5A nepřekročila maximální přípustnou hodnotu 320 HV 10 v žádné oblasti (ZM, TOO, SK).

### 8.6 Zkouška rázem v ohybu a její vyhodnocení

Zkouška rázem v ohybu byla provedena dle normy ČSN EN 10045-1. Pro zkoušku rázem v ohybu byla použita zkušební tyč s V – vrubem o nestandardních rozměrech 2,6x10x55 mm (viz obr. 8.7). Zkušební vzorky byly odebrány ze svarového kovu – VWT a označeny 4KV, 5KV a 6KV. Zkouška rázem v ohybu byla provedena v akreditované laboratoři na zkušebním zařízení PSW 300 AF, při teplotě 20 °C. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 8.5.



Obr. 8.7 Rozměry zkušební tyče

Tab. 8.5 Výsledné hodnoty zkoušky rázem v ohybu

Zkušební tyč	Teplota [°C]	Nárazová práce [J]	Vrubová houževnatost [J·cm <sup>-2</sup> ]
4KV	20 °C	29	139
5KV	20 °C	25	120
6KV	20 °C	26	125
<b>Průměrná hodnota</b>		<b>27</b>	<b>128</b>

Požadavek na minimální hodnotu nárazové práce pro základní materiál 1.4008+QT je 27 J při teplotě 20 °C (viz tab. 3.7). U svarového spoje oběžného kola čerpadla byly zjištěny ve svarovém kovu hodnoty nárazové práce o průměru 27 J při teplotě 20 °C. Z výsledků je proto patrné, že svarový kov splňuje požadavky na minimální hodnotu nárazové práce pro základní materiál.

### 8.7 Makrostruktura svarového spoje a její vyhodnocení

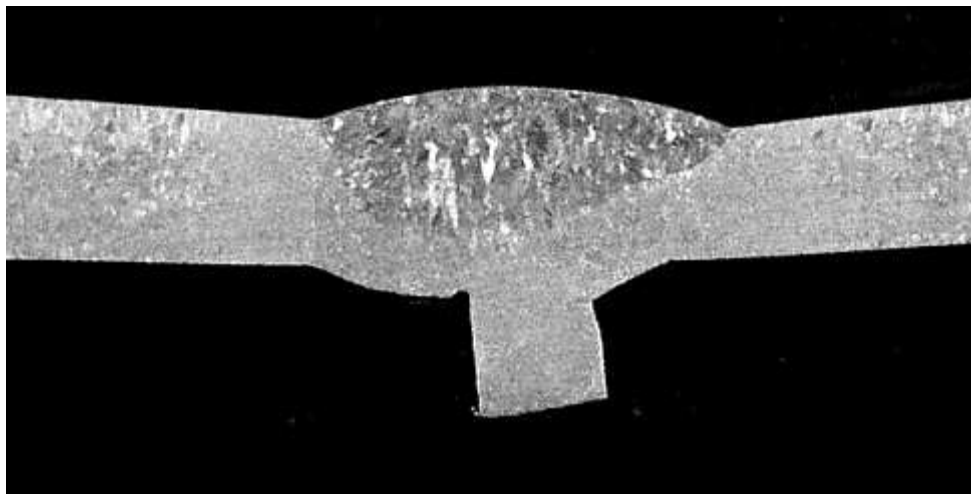
Makroskopická kontrola svarového spoje byla provedena dle normy ČSN EN 1312. Makrostruktura naleptaného svaru byla posouzena vizuálně při zvětšení 5x.

Makrostruktura svarového spoje vzorku 4A a 2B byla provedena v akreditované laboratoři. Pro naleptání vzorků na makrostrukturu bylo použito leptadlo B.3. Složení

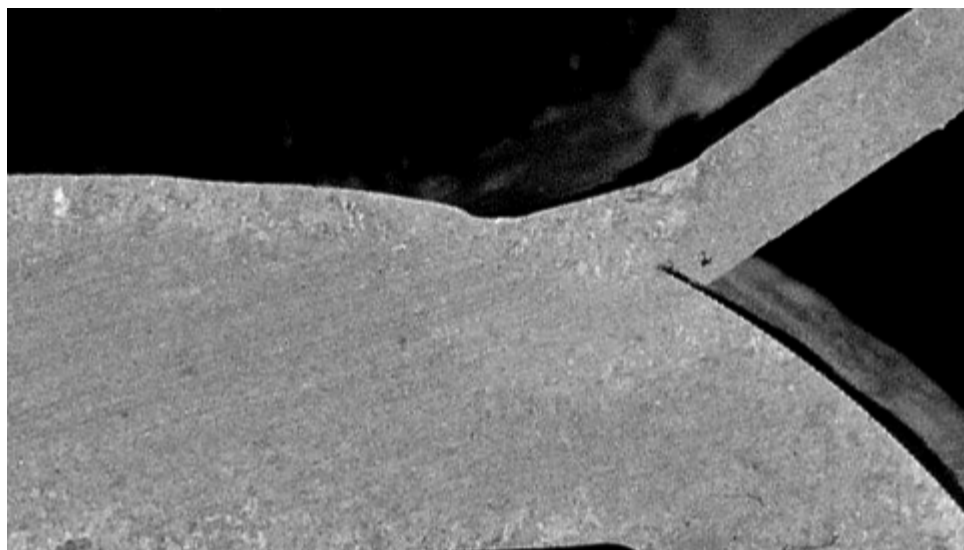
leptadla B.3 je uvedeno v tab. 8.6. Makrostruktura svarového spoje vzorku 4A a 2B (viz obr. 8.8 a obr. 8.9) byla provedena na stereomikroskopu OLYMPUS SZX9.

Tab. 8.6 Složení leptadla B.3 dle CR 12361:1996

B.3
480 ml H <sub>2</sub> O
120 ml HCl
50 g FeCl <sub>3</sub>



Obr. 8.8 Makrostruktura svarového kovu vzorku 4A – zvětšeno 5x



Obr. 8.9 Makrostruktura svarového kovu vzorku 2B – zvětšeno 5x

Vady ve svarovém spoji byly vyhodnoceny dle normy ČSN EN ISO 5817 stupeň jakosti B. Na vzorcích 4A a 2B nebyly identifikovány žádné vady.



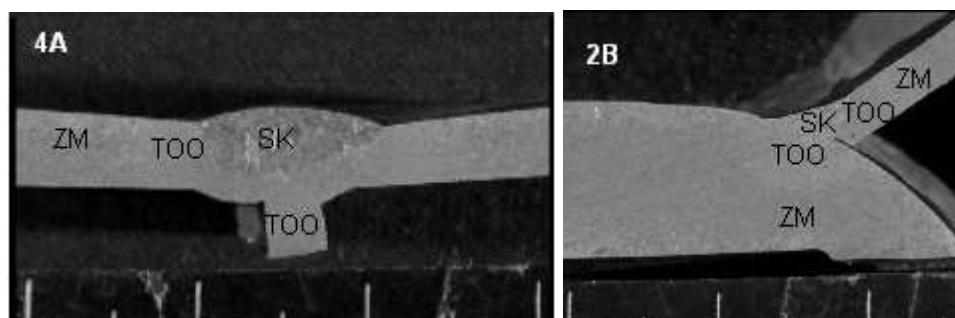
### 8.8 Mikrostruktura svarového spoje a její vyhodnocení

Mikroskopická kontrola svarového spoje byla provedena dle normy ČSN EN 1312. Mikrostruktura naleptaného svaru byla posouzena pod mikroskopem při zvětšení 200x.

Mikrostruktura svarového spoje vzorku 4A a 2B byla provedena v akreditované laboratoři. Pro naleptání vzorků na mikrostrukturu bylo použito leptadlo B.8. Složení leptadla B.8 je uvedeno v tab. 8.7. Mikrostruktura svarového spoje vzorku 4A a 2B byla provedena na stereomikroskopu OLYMPUS SZX9. Na obrázku 8.10 jsou zobrazeny oblasti, kde byla mikrostruktura zdokumentována.

Tab. 8.7 Složení leptadla B.8 dle CR 12361:1996

B.8
39 ml H <sub>2</sub> O
52 ml HCl
9 ml HNO <sub>3</sub>



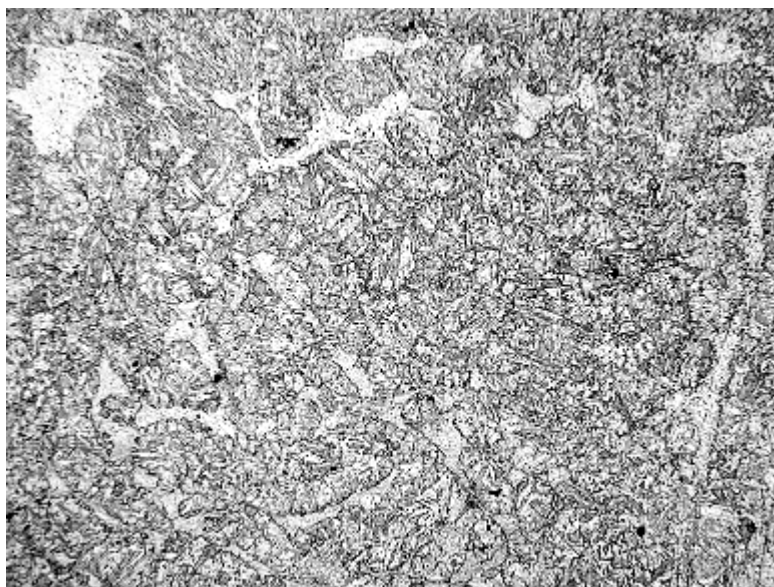
Obr. 8.10 Oblast dokumentace mikrostruktury vzorků 4A a 2B

Na obrázku 8.11 je zobrazena mikrostruktura svarového kovu vzorku 4A, která byla identifikována jako popuštěný martenzit.



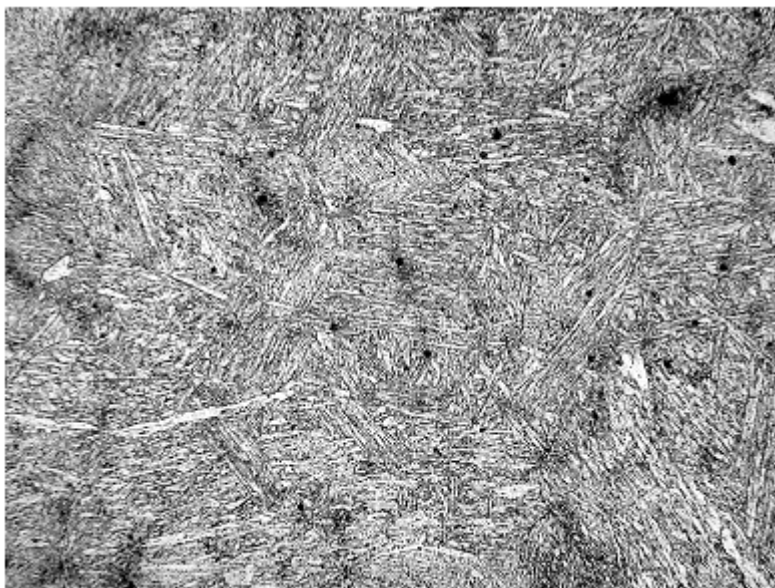
Obr. 8.11 Mikrostruktura svarového kovu, vzorek 4A – zvětšeno 200x

Mikrostruktura TOO vzorku 4A je tvořena pouštěným martenzitem a útvary feritu (viz obr. 8.12).



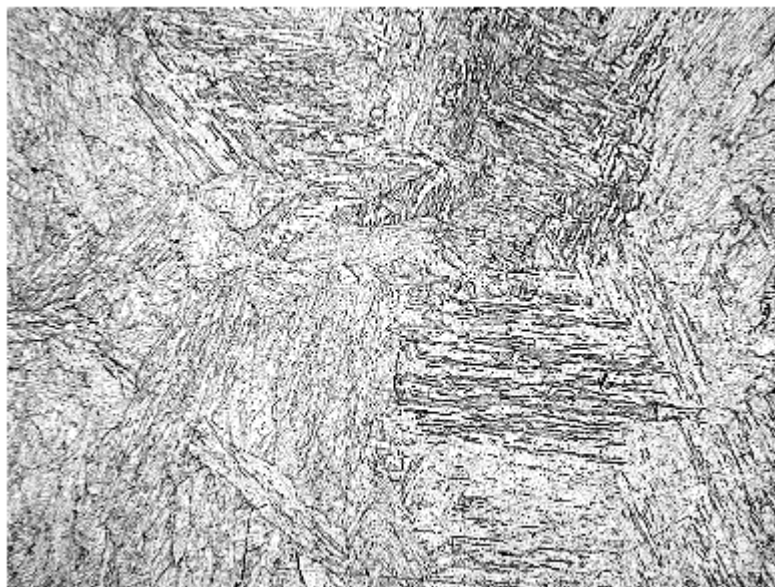
Obr. 8.12 Mikrostruktura TOO, vzorek 4A – zvětšeno 200x

Na obrázku 8.13 je zobrazena mikrostruktura základního materiálu vzorku 4A, která je tvořena popuštěným martenzitem a útvary feritu.



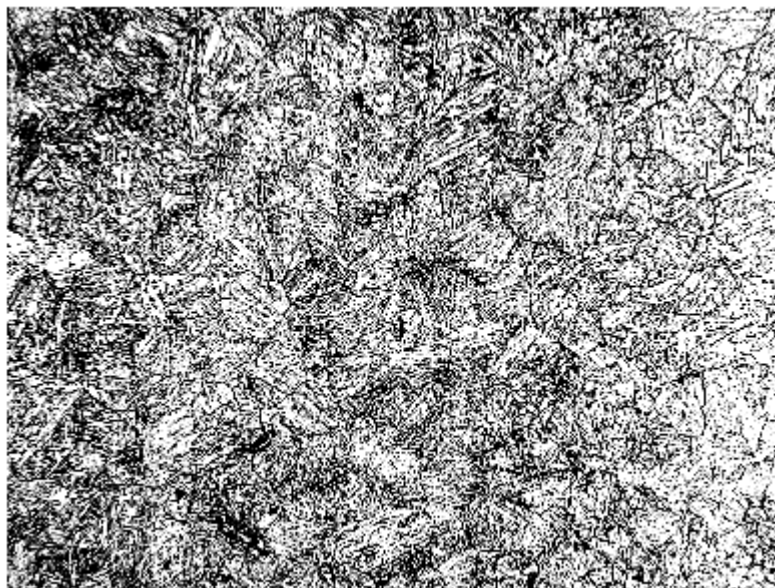
Obr. 8.13 Mikrostruktura základního materiálu, vzorek 4A – zvětšeno 200x

Mikrostruktura svarového kovu vzorku 2B dle obrázku 8.14 byla vyhodnocena jako popuštěný martenzit.



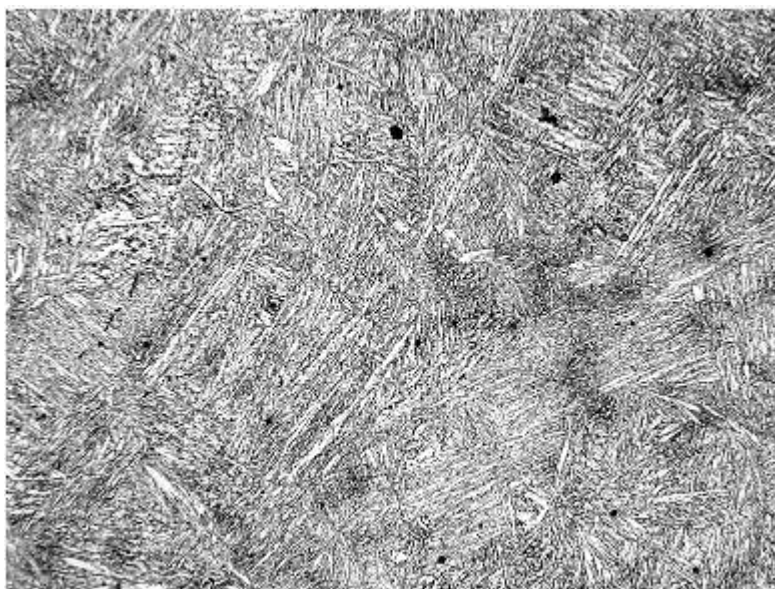
Obr. 8.14 Mikrostruktura svarového kovu, vzorek 2B – zvětšeno 200x

Na obrázku 8.15 je zobrazena TOO vzorku 2B, jejíž strukturu tvoří popuštěný martenzit.



Obr. 8.15 Mikrostruktura TOO, vzorek 2B – zvětšeno 200x

Mikrostruktura základního materiálu je tvořena popuštěným martenzitem a útvary feritu (viz obr 8.16).



Obr. 8.16 Mikrostruktura základního materiálu, vzorek 2B – zvětšeno 200x

## 9 Celkové zhodnocení výsledků

Dodané oběžné kolo čerpadla bylo svařeno metodami svařování 141 a 52. Jako základní materiál byla použita martenzitická chromová ocel 1.4008+QT. Před svařováním nebyl aplikován přehřev. Po svařování nebyl aplikován dohřev a tepelné zpracování.

Svarové spoje svařené metodou 141 (vzorky 1A, 2A a 3A) byly podrobeny chemické analýze. Na základě výsledků chemické analýzy, byly navrženy přídatné materiály, kterými bylo oběžné kolo pravděpodobně svařeno.

Dále byly svarové spoje podrobeny destruktivním metodám zkoušení, aby se ověřily mechanické vlastnosti takto svařených spojů.

Zkouška tvrdosti HV 10 byla provedena na zkušebním vzorku 2A dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Naměřené hodnoty tvrdosti byly proměnlivé. Hodnota tvrdosti v TOO překročila maximální přípustnou hodnotu 350 HV 10. Dále byla na svarových spojkách oběžného kola provedena zkouška rázem v ohybu dle normy ČSN EN 10045-1. Požadavek na minimální hodnotu nárazové práce pro základní materiál 1.4008+QT je 27 J při teplotě 20 °C. U svarového spoje oběžného kola čerpadla byly zjištěny ve svarovém kovu nízké hodnoty nárazové práce o průměru 5 J při teplotě 20 °C. Zkouška makrostruktury a mikrostruktury dle normy ČSN EN 1312 byla provedena na vzorcích 1A, 2A, 3A a 1B. V oblasti svarového kovu byly zjištěny nepřípustné vady v podobě trhlin, pórů a neprovařeného kořene.

Na základě výsledků všech provedených destruktivních zkoušek byl svarový spoj dodaného oběžného kola čerpadla vyhodnocen jako nevyhovující.

Vzhledem k nevyhovujícím výsledkům svarových spojů dodaného oběžného kola čerpadla byla navržena optimalizace technologie svařování oběžného kola. Oběžné kolo čerpadla z martenzitické chromové oceli 1.4008+QT bylo dle nově navrženého technologického postupu svařeno metodou 141. Před svařováním byl aplikován přehřev 200 °C. Po svařování byl aplikován dohřev 250 °C/1h a tepelné zpracování o těchto parametrech: rychlost ohřevu 100 °C/h, teplota/čas výdrže 680 °C/3h a rychlost ochlazování 50 – 70 °C/h. Pro oba typy svarů byl použit svařovací drát CN 3/4-IG od výrobce Böhler a ochranný a formovací plyn Arcal TIG – MIG (skupina dle ČSN EN ISO 14175-II).

Svarové spoje byly podrobeny nedestruktivním a destruktivním zkouškám

Svarový spoj oběžného kola čerpadla byl podroben penetrační zkoušce dle normy ČSN EN 571-1. Na svarových spojích nebyly identifikovány žádné povrchové vady.

Na vzorcích 4A a 5A byla provedena zkouška tvrdosti HV 10 dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Hodnoty tvrdosti nepřekročily v žádné oblasti svarového spoje maximální přípustnou hodnotu 320 HV 10. Zkouškou rázem v ohybu dle normy ČSN EN 10045-1 byly prokázány vyhovující hodnoty nárazové práce v průměru 27 J při teplotě 20 °C. Zkouška makrostruktury a mikrostruktury dle normy ČSN EN 1312 byla provedena na vzorcích 4A a 2B. Ve svarovém spoji vzorků 4A a 2B nebyly identifikovány vady dle normy ČSN EN ISO 5817 stupeň jakosti B.

Na základě výsledků všech provedených nedestruktivních a destruktivních zkoušek byl svarový spoj oběžného kola čerpadla po optimalizaci technologie svařování, včetně tepelného zpracování, vyhodnocen jako vyhovující.

## 10 Závěr

Cílem diplomové práce bylo stanovit vhodné metody svařování oběžného kola čerpadla, svařovací parametry a podmínky tak, aby se zajistila vyhovující jakost svarových spojů.

V teoretické části byla prostudována svařitelnost martenzitických chromových ocelí. Konkrétně jsem se zaměřila na svařitelnost martenzitické chromové oceli 1.4008. Dále jsem navrhla vhodné metody svařování. Na základě zvolených metod svařování byly navrženy přídatné materiály vhodné pro martenzitické chromové oceli.

V experimentální části jsem se zabývala dvěma svarovými spoji oběžných kol, které byly svařeny dvěma různými technologickými postupy. U technologického postupu svařování dodaného oběžného kola byly navrženy metody svařování 141 a 52, bez použití přehřevu, dohřevu a tepelného zpracování. Po provedení destruktivních zkoušek byly svary takto svařeného oběžného kola vyhodnoceny jako nevyhovující. Na základě nevyhovujících výsledků byly podmínky svařování optimalizovány. Pro nový

technologický postup svařování oběžného kola byla navržena metoda svařování 141. Byl zde aplikován předeřev, dohřev a tepelné zpracování. Po provedení nedestruktivní zkoušky bylo prokázáno, že na svarových spojích se nevyskytují vady. Avšak byly zde identifikovány vady odlitku. Na základě penetrační zkoušky základního materiálu odlitku bylo doporučeno výrobcí oběžného kola čerpadla zlepšit výrobu oběžných kol. Výsledky destruktivních zkoušek prokázaly, že svarové spoje jsou vyhovující.

Výsledky experimentální části diplomové práce potvrzují, že po optimalizaci podmínek svařování a tepelného zpracování je možné svarový spoj oběžného kola čerpadla z oceli 1.4008+QT svařovat metodou 141 se zvolenými přídavnými materiály a parametry svařování.

**Použitá literatura**

- [1] KUČERA, J. *Teorie svařování*. 2. vyd. Ostrava: VŠB-TUO, 1991. 408s. II-220491-3074/91
- [2] KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I*. 1. vyd. VŠB-TUO, 2005. 136s. ISBN 80-248-0870-6
- [3] KOUKAL, J; SCHWARZ, D; HAJDÍK J. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., VŠB-TUO, 2009. 241s. ISBN 978-80-248-2025-5
- [4] FREMUNT, P., PODRÁBSKÝ, T. *Konstrukční oceli*. Brno: CERM, 1996. 267s. ISBN 80-85867-95-8
- [5] NĚMĚC, J. *Svařování korozivzdorných a žárovzdorných ocelí*. Praha: SNTL, 1975. 165s. L13-B2-IV-21/22 400
- [6] KUNCIPÁL, J. a kolektiv. *Teorie svařování*. Praha: SNTL/ALFA, 1986. 265s. I-208923-972/98
- [7] HRIVŇÁK, I. *Zvariteľnosť ocelí*. Bratislava: ALFA, 1979. 235s. II-152635-799/80
- [8] TURŇA, M. *Špeciálne metódy zvarovania*. Bratislava: ALFA, 1989. 384s. ISBN 80-05-00097-9
- [9] MINAŘÍK, V. *Obloukové svařování*. Praha: Scientia, 1998. 229s. ISBN 80-7183-119-0
- [10] Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava: ZEROSS, 2001. 395s. ISBN 80-85771-81-0
- [11] WEGST, C., WEGST, M. *Stahlschlüssel*. Verlag Stahschüssel Wegst, 2007. 745s. ISBN-13: 978-3-922599-23- 4



- [12] ČSN EN ISO 13916. *Svařování – Směrnice pro měření teploty přehřevu, teploty interpass a teploty ohřevu*. Praha: ČNI, červen 1998
- [13] ČSN EN 1011 – 3. *Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 3: Obloukové svařování korozivzdorných ocelí*. Praha: ČNI, duben 2002
- [14] ČSN 42 2904. *Ocel na odlitky 42 2904 Cr-Ni*. Praha: ČNI, 1976
- [15] ČSN EN ISO 4063. *Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování*. Praha: ČNI, březen 2010
- [16] ČSN EN ISO 6507 – 1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: ČNI, srpen 2006
- [17] ČSN EN 10045 – 1. *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho – Část 1: Zkušební metoda (V a U vruby)*. Praha: ČNI, červen 1998
- [18] ČSN EN 1321. *Destruktivní zkoušky kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: ČNI, červenec 1998
- [19] ČSN EN ISO 15614 – 1. *Stanovení a kvalifikace postupu svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: ČNI, květen 2005
- [20] ČSN EN 571 – 1. *Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady*. Praha: ČNI, listopad 1998
- [21] TNI CEN ISO/TR 15608. *Svařování – Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin*. Praha: ČNI, únor 2008
- [22] ČSN EN ISO 5817. *Svařování – Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) – Určování stupňů kvality*. Praha: ČNI, leden 2008

- [23] ČSN EN ISO 14175. *Svařovací materiály – Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*. Praha: UNMZ, únor 2009
- [24] <http://www.bolzano.cz/divize/hutni-materialy/reference/obezna-kola-turbokompresoru/> [online]. c2007, [cit. 2010-03-20]
- [25] [www.bohler.cz](http://www.bohler.cz) [online]. [cit. 2010-03-29]
- [26] <http://www.avestawelding.com/3979.epibrw> [online]. [cit. 2010-04-01]
- [27] HAJDÍK, J., HEINRICH, M. *Svařování vysokolegovaných ocelí* [online]. c2007, [cit. 2010-04-04]. ISSN 1214-4983. Dostupné z: [http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Sva%C5%99.vysoce.leg1\\_2007.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Sva%C5%99.vysoce.leg1_2007.pdf).
- [28] <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008011702> [online]. c2009, [cit. 2010-03-28]
- [29] [www.esab.cz](http://www.esab.cz) [online]. [cit. 2010-03-01]
- [30] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Ob%C4%9B%C5%BEn%C3%A9\\_kolo](http://cs.wikipedia.org/wiki/Ob%C4%9B%C5%BEn%C3%A9_kolo) [online]. [cit. 2010-03-20]
- [31] ROUBÍČEK, M. *Laserové svařování – ekonomika a kvalita*. [online]. c2008, [cit. 2009-10-29]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/laserove-svarovani-ekonomika-a-kvalita/>
- [32] KUBÍČEK, J., MRŇA, L. *Technické aspekty svařování laserem*. [online]. c2008, [cit. 2009-10-29]. Dostupné z: <http://www.svarak.cz/>.

## **Seznam příloh**

Příloha č. 1 – Výkres oběžného kola čerpadla

Příloha č. 2 – Vady svarového kovu svařeného dodaného oběžného kola čerpadla